INVESTIGACION y CIENCIA

CABALLOS PURA SANGRE: CABAÑA DE ORO

ASTROSISMOLOGIA

SUPERCONDUCTIVIDAD A ALTAS TEMPERATURAS



RETINAS DE SILICIO

JULIO 1991
600 PTAS.



Julio de 1991 Número 178

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ana García: *Avances en la terapia de rehidratación oral*; Ramón Pascual: *Alones*; Mª José Báguena: *René Jules Dubos*; Amando García: *La retina de silicio*; Juan P. Adrados: *Formación de los yacimientos minerales*; Antonio Rodero: *Genética del caballo pura sangre*; Jordi Puiggené y Pedro Molera: *Ingeniería mecánica del Islam medieval*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Hace...*

Ciencia y sociedad:

José Mª Costa Torres y Fco. Sagués Mestre, Joandomènec Ros y J. Enric Llebot

Ciencia y empresa:

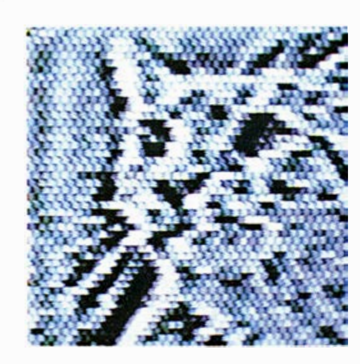
Manuel Puigcerver

Libros:

Luis Navarro, Joandomènec Ros y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7	Norbert Hirschhorn
8-9	George V. Kelvin
10-12	Laurie Grace
15	Comstock, Inc./Hartman-DeWitt
16-17	Andrew Christie
18	David Poole
19-20	Andrew Christie
25	Lawrence R. Moberg
26	Harris County Medical Archive, Houston
27	Laurie Grace
28	Vernon Knight (*izquierda*), BioPhoto Associates/Science Source/Photo Researchers, Inc. (*derecha*)
30	Don Riepe/American Littoral Society
43	Jessie Simmons
44	Andrew Christie
45-46	Jessie Simmons
47	Andrew Christie, Jessie Simmons (*inserción fotográfica*)
48	Jessie Simmons
50-51	Juan Pablo Lira
52-57	Hank Iken
60-61	Dan Dry & Associates
62	Edward Bell (*abajo*)
62-63	Julie A. Wear (*arriba*)
64-66	Johnny Johnson
68	Gabor Kiss
69	George Retseck
70	World of Islam Trust, Peter N. Hayward (*modelo*)
71-73	George Retseck
77	Juan A. Belmonte, Fernando Pérez y Teodoro Roca
78-85	Juan A. Belmonte, Fernando Pérez, Teodoro Roca y Expogràfic, S.A.
86-88	Johnny Johnson



LA FOTOGRAFIA de la portada muestra la forma en que una retina de silicio ve a un gato. El microcircuito en que se basa esta retina fue diseñado por los autores en el Instituto de Tecnología de California con el fin de construir un modelo del sistema de procesamiento visual de la retina humana. La señal de salida producida por la pastilla quedó registrada en una cinta de vídeo, para fotografiarla luego y obtener la imagen que reproducimos (véase "La retina de silicio", por Misha A. Mahowald y Carver Mead, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6600	12.000
Extranjero	7300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

— Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45 - Fax 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
08003 Barcelona
Tel. 268 45 05 - Fax 268 16 07

ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Tecfa. Línea Fotomecánica, Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

Scientific American: "Necesitamos pilotos, pilotos y más pilotos; aunque la preparación técnica de nuestra juventud nos permite ya disponer con abundancia de combatientes bien capacitados, carecemos de una reserva de jóvenes entre los que reclutar pilotos. Este problema tiene una solución viable, económica y efectiva. Abramos las puertas de la aeronáutica a todos lo muchachos que se interesen por ella, brindándoles la oportunidad de aprender vuelo a vela. Cuando hayan aprendido a manejar un velero, a aprovechar las corrientes de aire para mantener el vuelo y a enfrentarse con las pequeñas emergencias que una y otra vez se presentan en todo vuelo sin motor, sabrán tanto acerca de éste que podrán transformarse en pilotos de vuelo a motor en una fracción del tiempo y a una fracción del coste necesarios para adiestrar a un aspirante novato. Además, conocerán ya ciertas cosas sobre el aire que un piloto quizá no aprenda hasta que resulte demasiado tarde."

"El agotamiento y la inseguridad mentales se han visto acrecentados en todos los pueblos por las actitudes belicistas y por el malestar económico y social que se dan en todo el mundo, con el resultado de que el antiguo interrogante, tan viejo como el hombre, acerca de lo que pasará la semana que viene, o el año que viene, provoca una peligrosa inclinación pública hacia la futilidad y una proclividad al retorno a los así llamados ritos esotéricos en torno a un culto o a una persona, en un intento desesperado por hallar la respuesta al futuro."

"La proyección sobre una pantalla de gran tamaño constituye el avance más espectacular de la televisión en los últimos tiempos. En una demostración ofrecida por RCA y NBC en un teatro de Nueva York, se presentó un programa completo mediante una instalación montada a tal efecto. Se ofreció así una obrita teatral escenificada "en directo", la transmisión de un noticiario, un noticiario cinematográfico tomado directamente de la película y un combate del campeonato de boxeo captado desde un costado del ring. En opinión de los espectadores, la calidad de la reproducción fue buena y el combate se veía mejor que desde una silla de ring."

...cien años

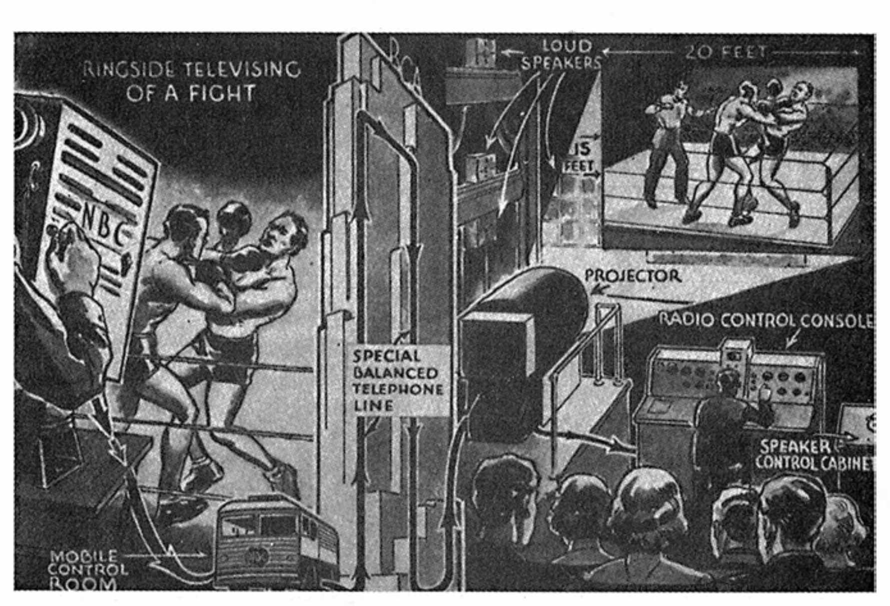
Scientific American: "No hay corporación científica del país que cuente con tantos millonarios como el Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos. Encabeza la lista Alexander Graham Bell, cuyas ganancias por el teléfono son de ocho cifras. Le sigue Edison con una fortuna de siete cifras. Multimillonarios son Brush, famoso por la luz eléctrica, y Elihu Thomson (cuyo futuro económico sea ahora quizá más brillante que el de los restantes). Las más de estas personas eran telegrafistas y, en su mayoría, empezaron sin un dólar sus experimentos y estudios."

"La adición al acero de un pequeño porcentaje de uranio aumenta su elasticidad y, a la vez, su dureza, en un grado que su uso por los fabricantes de cañones, blindajes, etc., puede resultar del mayor interés, pero la rareza de este metal y particularmente la gran dificultad de reducir el mineral a metal elevan excesivamente el precio del acero al uranio."

"El señor C. Vernon Boys ha realizado medidas del calor de la Luna valiéndose de su delicadísimo radiomicrómetro. Su método consistía en enfocar los rayos de la Luna sobre la cara del instrumento mediante un telescopio reflector de 40 cm de abertura. En el caso de la Luna nueva, descubrió que el calor procedente del disco de aquélla disminuía al pasar del borde convexo al cóncavo y que el procedente de la superficie oscura era tan insignificante que no afectaba al instrumento."

"*Al director de Scientific American*: Con referencia a su número de esta fecha, y bajo el título "Un insecto perfora un tubo de plomo", estoy en posesión de una bala que extraje del árbol bajo el cual Grant y Pemberton acordaron la rendición de Vicksburg (Missouri). La bala estaba alojada debajo de la corteza en la zona jugosa del árbol y presenta tres orificios que la atraviesan, abiertos por algún tipo de insecto. Uno de éstos se encontraba en uno de los orificios en el momento en que me hice con el proyectil. Esto pueden confirmarlo dos testigos aún vivos. Wm. E. Selleck, Chicago, 13 de junio de 1891.

"Se cree que en el reino animal hay indicios de una ley que fija la duración máxima de la vida en cinco veces el tiempo de crecimiento. Este, para el hombre, podría decirse que es de 21 años por término medio. Por tanto, para un hombre perfectamente sano, la vida debería estar comprendida entre 100 y 105 años. Pero como ocurre que nadie nace perfecto y sin taras, la esperanza de vida varía mucho. Todo ser humano empieza su trayecto vital con una cierta fuerza vital; o, en otras palabras, cual si fuera un reloj, está construido para funcionar un cierto tiempo bajo unas condiciones dadas."



La televisión va al teatro.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Avances en la terapia de rehidratación oral

Cada año, este sencillo tratamiento —administrar una solución de electrolitos— salva a un millón de niños que se deshidratarían por la diarrea. Se trabaja en nuevas versiones que mejoren su eficacia

Norbert Hirschhorn y William B. Greenough III

Cuando la investigación médica descubre nuevos tratamientos, éstos suelen ser complejos, caros e inaccesibles para muchos. La terapia de rehidratación oral (TRO) constituye una notable excepción a esa norma habitual. Se trata de un antídoto sencillo, de bajo coste y fácil obtención frente a un problema gravísimo: la deshidratación que acompaña a la diarrea. Se le administra al paciente una solución electrolítica por vía oral para reponer la pérdida intestinal de fluidos y iones vitales. Para mayor fortuna, un estudio reciente acaba de señalar varias formulaciones sencillas, mejores en muchos casos que la solución comúnmente empleada.

Toda ponderación de la TRO se queda corta. En su conjunto, los agentes inductores de la diarrea (la bacteria del cólera *Vibrio cholerae*, los rotavirus y *Escherichia coli*) son los principales responsables de la mortalidad infantil en las naciones en vías de desarrollo. Aunque la mayoría de los ataques de diarrea no suponen una amenaza para la vida, se calcula que, cada año, mueren 4 millones de niños menores de 5 años en todo el mundo por esta alteración, es decir, más de la cuarta parte de los 14 millones de muertes anuales en este grupo de edad.

Antes de 1978, fecha en que la Organización Mundial de la Salud y otras entidades empezaron a promocionar intensamente la TRO, la terapia de rehidratación intravenosa era el único tratamiento aceptado. Entonces, como ahora, permitía salvar a la mayoría de las víctimas de la diarrea. Pero requería enormes cantidades de solución estéril que debían administrar profesionales en ambulatorios y hospitales, lo que resultaba imposible en muchas zonas del mundo.

La terapia oral salva ya, cada año, a 1 millón de niños. En estos mismos días, ha permitido mantener el número de víctimas sorprendentemente bajo en Perú, donde se ha desencadenado, desde enero, un fuerte brote de cólera (la primera epidemia que asola al hemisferio occidental en un siglo). La verdad es que se evitaría la inmensa mayoría de muertes por diarrea, en adultos y niños, si las familias supieran preparar y suministrar algún tipo de TRO. Salvo en épocas de absoluta carestía, los ingredientes necesarios para preparar la fórmula están en cualquier hogar.

La administración rutinaria e inmediatamente después del inicio de la diarrea podría también reducir la malnutrición que sufren los enfermos. En los países en vías de desarrollo, un niño viene a padecer de 10 a 20 episodios de diarrea antes de llegar a los tres años (lo que supone que hasta el 13% del tiempo de su vida lo pasa enfermo por diarrea), y, por tanto, esta alteración es causa principal de malnutrición en todo el mundo. Añádase que la malnutrición puede aumentar la gravedad, duración y frecuencia de los episodios futuros. Se produce así un círculo vicioso de malnutrición e infección.

No se ha logrado todavía la administración rutinaria de la TRO en cada casa. Pero se avanza en esa dirección. Y prosigue la investigación científica para redoblar la eficiencia del tratamiento, su aceptación y su eficacia contra la malnutrición.

La terapia de rehidratación oral es resultado de la investigación clínica y de laboratorio sobre la digestión normal y los procesos que causan la diarrea. En los estudios acerca de la digestión se observó que, cada día, el cuerpo moviliza muchos litros de fluidos desde la sangre hacia el intestino, y de nuevo hacia la sangre. Después de que el estómago vacía su contenido de alimentos en la luz, o cavidad, del intestino delgado, las llamadas células de las criptas de la mucosa intestinal secretan iones cloruro (Cl^-) en la cavidad. Estos iones provocan un flujo paralelo de agua y de otros iones, entre ellos el sodio (Na^+), de la sangre hacia el intestino.

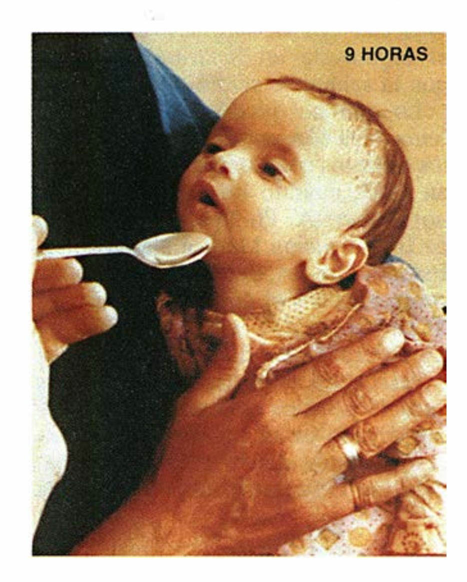
NORBERT HIRSCHHORN y WILLIAM B. GREENOUGH III coincidieron en 1964 en Pakistán Oriental (hoy Bangladesh). Hirschhorn, doctor en medicina y poeta, es vicepresidente de John Snow Inc., empresa asesora en cuestiones de salud pública. Ha sido investigador, profesor y consejero de programas pediátricos en muchos países. En 1990, ganó el premio Charles A. Dana por sus logros en el desarrollo y aplicación de la terapia de rehidratación oral. Greenough, doctor en medicina y corredor de fondo, es profesor en la Universidad Johns Hopkins. Dirigió el Centro de Investigación de las Enfermedades Diarreicas en Dhaka. Se esfuerza ahora por mejorar la salud de los ancianos en Estados Unidos, quienes, al igual que los niños en los países en vías de desarrollo, tienen mayor riesgo de morir por diarrea, malnutrición o infecciones.

1. NIÑO EGIPCIO que se salvó de la muerte por diarrea gracias a la aplicación de la terapia de rehidratación oral. Esta extraordinaria secuencia fotográfica muestra que, a las 9 de la mañana, el pequeño necesitaba del auxilio de su madre y de un enfermero para poder ingerir. Una hora más tarde, con algún líquido ya en su cuerpo, aceptaba con viveza las cucharadas. A mediodía perdió interés, cuando había tomado todo lo que necesitaba. Los signos de deshidratación habían pasado ya: languidez, hundimiento de los ojos y aplatamiento de la región del cuero cabelludo. A la 1,15 había recobrado tal apetito, que buscaba la leche materna; ésta, amén de aportar nutrientes, insta el movimiento de fluidos hacia la sangre y limita la diarrea.

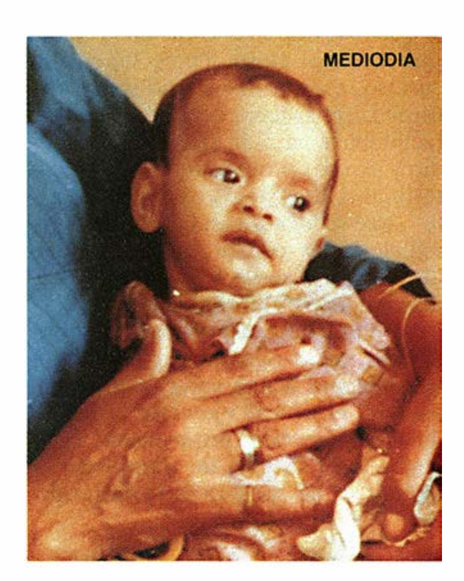
El líquido diluye la comida, facilitando su rotura en moléculas lo suficientemente pequeñas para atravesar la pared intestinal y llegar a la sangre. El almidón (hidrato de carbono complejo) se descompone en glucosa, las proteínas en aminoácidos y las grasas en ácidos grasos y glicerol.

A continuación, las células de las vellosidades, que tapizan el intestino delgado y, en menor número, constituyen la mucosa del colon o intestino grueso, captan los nutrientes. Las células de las vellosidades absorben también sodio durante la digestión. Lo introducen a través de su superficie intestinal y lo bombean hacia los espacios extracelulares, desde donde retorna a la circulación. A donde va el sodio, le siguen el agua y otros iones; de ese modo, tales sustancias pasan del intestino a la sangre.

La investigación sobre el cólera (fuente principal de información acerca de la fisiopatología y el tratamiento de la diarrea) y otras enfermedades puso de manifiesto que la mayoría de los microorganismos responsables alteraban la función intestinal y producían deshidratación a través de mecanismos similares: aumentaban la actividad de secreción de cloro por parte de las células de las criptas, impedían la absorción de sodio por parte de las células de las vellosidades o producían ambos efectos simultánea-







13:15 HORAS

mente. Por culpa de ello, los líquidos que habrían de regresar a la sangre a través de la pared intestinal se pierden en heces acuosas. El volumen de la sangre disminuye y la circulación puede hacerse peligrosamente lenta, causando la muerte en cuestión de días o, a veces, en unas pocas horas.

La investigación realizada en la década de los sesenta demostró que los microorganismos que dañaban las células de las vellosidades cerraban una vía principal de transporte del sodio, la que permitía su entrada en la célula junto con el cloro. Pero, fenómeno curioso, esos gérmenes no solían entorpecer el sistema de transporte que facilitaba la entrada en la célula de sodio y glucosa procedentes de la luz intestinal. Este sistema de "cotransporte", que se localiza en la superficie luminal de las células, opera sólo en presencia de sodio y glucosa, y permanece activo durante la diarrea.

La TRO descansa en ese descubrimiento. Si se agregaba, cabía suponer, glucosa a una solución de electrolitos, el azúcar ejercería el efecto de una inyección intravenosa. Estimulando el sistema de transporte simultáneo, se aseguraría la introducción de electrolitos y agua a la sangre a través de la pared intestinal.

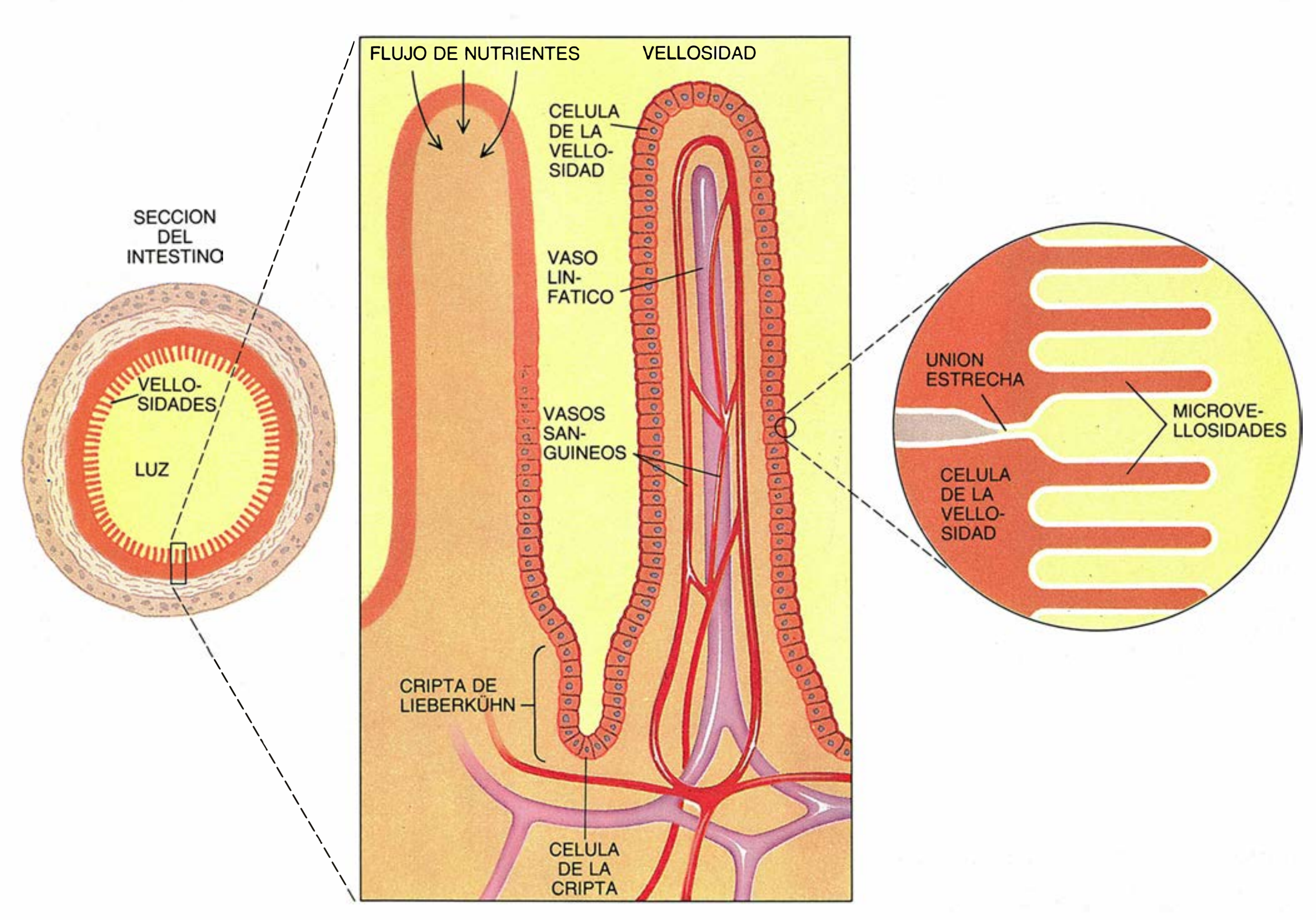
Aunque la aplicación de la TRO sea reciente, la idea de reponer oralmente los líquidos perdidos en la diarrea no constituye ninguna novedad. Los textos hindúes describen ya preparados con ese destino. Todas las culturas, puede afirmarse, han utilizado durante generaciones los "remedios de la abuela", como el caldo de pollo o el zumo de coco, que contienen sal, azúcar, almidones y proteínas.

Los primeros esfuerzos científicos en materia de rehidratación se centraron en la terapia intravenosa. En 1832, mucho antes de la teoría de los gérmenes, Thomas Latta, médico inglés, demostró que podía reponer intravenosamente los líquidos perdidos por los pacientes del cólera. Pasó, sin embargo, un siglo largo sin que los médicos aplicaran apenas la lección, por la incomodidad del propio método y porque el tratamiento provocaba a veces la misma muerte (al utilizarse soluciones sin esterilizar).

Existía también el problema de los ingredientes apropiados. En los años cuarenta, Daniel C. Darrow, del Hospital Johns Hopkins, demostró de manera contundente que sólo los fluidos intravenosos que contenían cloruro sódico (sal común), potasio y lactato podían salvar la vida. El sodio mantiene el equilibrio adecuado de líquidos entre las células, el espacio intercelular y la sangre. El cloro es necesario para la actividad secretora de muchas células. El potasio resulta esencial para el funcionamiento de todas las células, incluida la contracción muscular. El lactato, convertido por el organismo en bicarbonato, evita que la sangre se acidifique.

Lo que no quedó zanjado fue el tema de la concentración adecuada de los distintos componentes. Se resolvió en 1958, cuando un equipo dirigido por Robert A. Phillips, de la Unidad de Investigación Médica Naval de los Estados Unidos, determinó y midió la composición y el volumen real de los fluidos perdidos en las heces de los enfermos con diarrea.

En estudios posteriores, que los autores y varios colaboradores llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigaciones del Cólera en Dacca, Pakistán Oriental (convertido hoy en

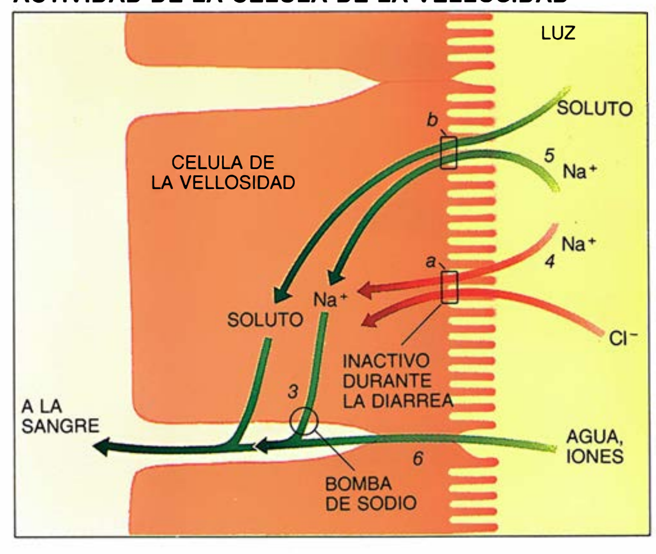


2. VELLOSIDADES, proyecciones formadas por pliegues en la pared del intestino delgado; contienen las células que absorben los nutrientes de la luz o cavidad intestinal. Estas células de las vellosidades pasan los nutrientes a la sangre o a la linfa. Las proyecciones de las células (microvellosidades) aumentan la superficie de absorción. En la base de las vellosidades se encuentran las células de la cripta, que participan en la digestión.

ACTIVIDAD DE LA CELULA DE LA CRIPTA

LUZ
CANAL DE IONES CLORO
CELULA DE LA CRIPTA
1
Cl^-
HIPERACTIVO DURANTE LA DIARREA
Cl^-
Na^+, AGUA Y OTROS IONES DE LA SANGRE
Na^+, AGUA Y OTROS IONES
2

ACTIVIDAD DE LA CELULA DE LA VELLOSIDAD



3. CELULAS DE LA CRIPTA Y DE LA VELLOSIDAD cooperan durante la digestión y dirigen los fluidos desde la sangre hacia la luz intestinal y de vuelta hacia la sangre. Las células de la cripta (*izquierda*) liberan iones de cloro (Cl^-) a la luz (*1*), desencadenando un flujo paralelo de iones sodio (Na^+) y, a su vez, de agua y de otros iones, desde la sangre hacia la luz intestinal (*2*). Más tarde (*derecha*), las células de la vellosidad bombean el sodio hacia el espacio intercelular (*3*), generando por tanto un movimiento compensador del sodio hacia las células procedente de la luz (*4.5*) e invirtiendo el sentido de flujo del agua (*6*). Los microorganismos causantes de la diarrea promueven la pérdida de líquidos induciendo la hipersecreción de cloruro por las células de la cripta, impidiendo que las células de la vellosidad activen sus canales de absorción del sodio (*a*) o mediante ambos mecanismos (*rojo*). La TRO compensa estos efectos e introduce líquidos en la sangre aumentando la actividad de los canales (*b*) que transportan el ion sodio al interior de las células de la vellosidad en presencia de solutos específicos (glucosa o determinados aminoácidos o péptidos).

Centro Internacional para la Investigación de la Diarrea, en Dhaka), se demostró que, si se intervenía pronto y se ofrecía una cantidad suficiente del fluido adecuado (a menudo varios litros), hasta los más deshidratados sobrevivían. Desde entonces, más del 99 por ciento de los pacientes con cólera, que antes tenían una probabilidad entre el 50 por ciento y el 60 por ciento de morir, se libraba, siempre que hubiera cerca un practicante con cantidad suficiente de fluido intravenoso y supiera administrarlo. Las tasas de supervivencia para otras enfermedades diarreicas experimentaron crecimientos similares.

Por ese tiempo se descubrió el fenómeno del cotransporte de glucosa y sodio. En 1966, uno de los autores (Hirschhorn), director de investigación clínica en el Laboratorio de Investigación del Cólera, halló, con otros expertos americanos y bengalíes, que el cotransporte de glucosa y sodio permanecía intacto en los atacados por el cólera.

Hirschhorn y sus colaboradores prepararon una solución de sodio y glucosa de administración oral y mostraron que niños y adultos con diarrea podían absorber una gran cantidad de dicha solución por el intestino. De manera casi simultánea, el equipo de Nathaniel F. Pierce, del Centro Internacional Johns Hopkins de Investigación y Formación Técnica en Calcuta, llegó a resultados similares.

La primera prueba de la efectividad de la TRO se consiguió en 1971. Por aquellas fechas, estaban entrando en la India dos millones de refugiados que huían de la guerra de Bangladesh. En los campamentos habilitados, miles de personas padecían el cólera y otras enfermedades diarreicas. La mortalidad superaba el 30%, debido, sobre todo, a la escasez de líquidos y jeringuillas necesarios para la inyección intravenosa, todavía el tratamiento de elección.

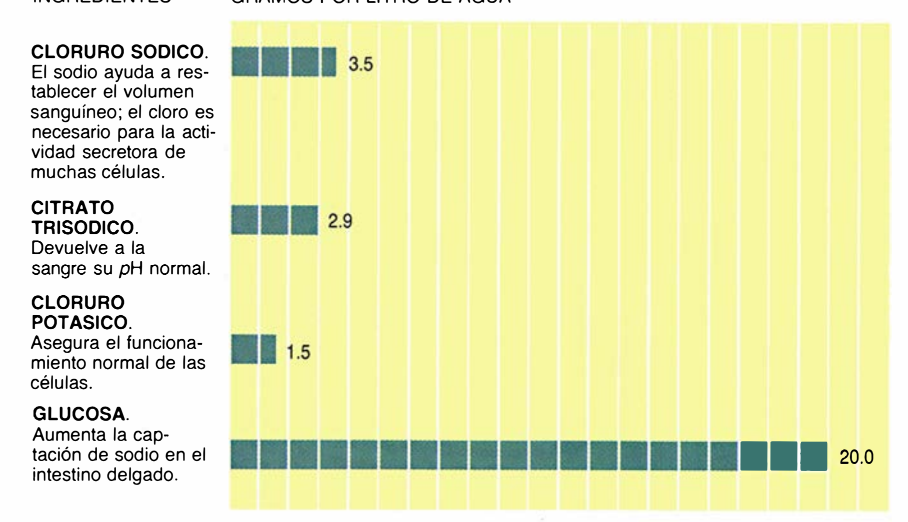
Pero en uno de los campos, el equipo encabezado por Dilip Mahalanabis suministró líquidos de rehidratación por vía oral. Para ser más precisos, ante la escasez de personal sanitario los familiares de los enfermos, niños predominantemente, ofrecían los preparados. Se les instruía para que suministraran todo el líquido que el paciente pudiera tomar hasta que la diarrea remitiera. Sólo las personas incapaces de beber recibían la escasa solución intravenosa. La mortalidad cayó hasta situarse en el 3%.

Ante la fuerza de esos datos, la OMS estableció en 1971 una fórmula normalizada que podía suministrarse a todos los grupos de edad, incluyendo lactantes. Los ingredientes actuales de la "TRO estándar", más diluidos que en la solución salina intravenosa, son cloruro sódico, cloruro potásico, citrato trisódico (en sustitución del menos estable bicarbonato de la fórmula de 1971), glucosa y agua.

Los ingredientes secos se fabrican y envasan localmente en más de 60 países; vienen a costar entre 20 y 60 pesetas por litro. La OMS calcula que cerca del 60% de los niños de todo el mundo tienen fácil acceso a la preparación y que alrededor del 30% de los infantes que contraen una diarrea son tratados con esta mezcla o con una fórmula menos completa preparada en casa.

Aunque se puede mejorar la disponibilidad de la TRO y su tasa de aplicación, se han conseguido importantes progresos. Los ministerios de sanidad de diferentes países, con el apoyo técnico y económico de la OMS, la UNICEF y otros organismos, han recomendado a miles de sanitarios y de familias la utilización de la TRO. Por otra parte, un estudio realizado en 25 hospitales universitarios de 19 países demostró que las muertes por diarrea disminuían sustancialmente —hasta en un 50%— después de instituir la rehidratación oral. En algunos ambulatorios, la cifra de ingresos por esa alteración ha bajado en más del 60% y el coste del tratamiento se ha reducido en más del 75%.

De todas las naciones, es en Egipto donde se ha conseguido un éxito más espectacular. En 1983, comenzó el Programa Nacional para el Control de las Enfermedades Diarreicas, en el que se combinaba la producción local de TRO estándar con la formación de sanitarios para su correcta aplicación y la educación general de la población a través de los medios de información. Antes de 1983, la mortalidad in-



4. SOLUCION DE TRO recomendada por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Constituye el tratamiento estándar para la diarrea en gran parte del mundo. Los envases, que contienen una mezcla de los ingredientes en seco, se expenden en más de 60 países.

fantil por diarrea superaba de lejos las 100.000 bajas; hoy no se llega ni a la mitad de esa cifra, por más que no se haya alterado la incidencia de la enfermedad.

Podría reconocerse que constituye un caso singular, pues se trata de un país con excelentes recursos. Tiene un ministerio de sanidad eficaz y una amplia red de centros públicos y privados, así como de establecimientos farmacéuticos. Además, las comunicaciones de acceso a dichos centros son buenas. El sistema sanitario está también consiguiendo controlar otras enfermedades que producen debilidad en los niños y, por tanto, aumentan el riesgo de muerte por diarrea. Muchos países no han llegado tan lejos porque carecen de esas ventajas.

Aunque el preparado de la TRO estándar haya salvado muchas vidas, no constituye todavía la fórmula ideal. Rehidrata y restablece el apetito y, por tanto, contrarresta la malnutrición, pero también exige una gran perseverancia por parte de la persona encargada de cuidar al enfermo, generalmente una madre muy atareada.

Un niño con diarrea puede necesitar tomar, cucharada a cucharada, más de medio litro diario de solución, en sesiones espaciadas tan sólo tres minutos y durante 5 o 7 días. Importa esa administración en tomas frecuentes y pequeñas porque el consumo de un gran volumen de preparado puede provocar el vómito. Para la mayoría de las madres este trabajo supone un gran esfuerzo, ya que, en los países en vías de desarrollo, deben atender a otros hijos, preparar la comida para todos, lavar la ropa, acarrear el agua (a veces desde muy lejos) y trabajar en el campo o cuidar los animales. En los países industrializados, los padres podrían tener también dificultades por las exigencias de su trabajo y de atención al resto de la familia.

Padres y médicos quieren lo mismo: detener cuanto antes la diarrea. Pero la TRO estándar no acorta la duración de la diarrea ni merma su volumen; se limita a aportar los líquidos y electrolitos que se pierden.

El fracaso en la curación de la diarrea puede desanimar a los padres en la persistencia del tratamiento. Para muchos, carece de sentido ofrecer líquido a quien lo está perdiendo sin tasa. Además, la incapacidad del preparado para detener la diarrea suele incitar, a las familias, la búsqueda de otros remedios: antibióticos caros e ineficaces, por lo común, que prolongan la diarrea al matar la flora bacteriana benefactora que habita en el intestino.

A primera vista, aumentar la cantidad de glucosa presente en la TRO podría ser una solución razonable para acelerar la ingesta de líquido y así reducir el volumen de la diarrea. Pero la incorporación de glucosa en la preparación implicaría un riesgo, cuya causa se halla en el fenómeno de ósmosis. Cuando dos soluciones acuosas están separadas por una membrana semipermeable, la solución con mayor concentración de moléculas disueltas (solutos) atraerá líquido procedente de la solución menos concentrada.

Ahora bien, la TRO estándar contiene aproximadamente tantas moléculas de solutos como la sangre en condiciones normales. Si se añadiera más glucosa, la concentración de la solución sería mayor que la de la sangre normal, o lo que es lo mismo, aumentaría su osmolaridad, su tendencia a atraer el agua. En ese caso, el agua fluiría desde la sangre hacia la luz intestinal, exacerbando el estado de deshidratación.

Podemos reforzar la absorción de líquidos si agregamos uno o más aminoácidos seleccionados a la fórmula de la TRO estándar. Sabemos ya que, además del sistema de cotransporte de la glucosa y el sodio, las células de las vellosidades tienen muchos otros sistemas de cotransporte que introducen simultáneamente aminoácidos específicos y sodio desde la luz intestinal hacia el interior de la célula. En

MUERTES POR 1000 NACIDOS VIVOS (LACTANTES) O POR 1000 NIÑOS ENTRE 1 Y 4 AÑOS DE EDAD
60
50
40
30
20
10
0
1976
1978
1980
1982
1984
1986
1988
INTRODUCCION DE LA TRO
EMPIEZA LA CAMPAÑA NACIONAL CONTRA LA DIARREA
DIARREA, LACTANTES (HASTA 1 AÑO DE EDAD)
OTRAS CAUSAS, LACTANTES
DIARREA, EDAD 1-4 AÑOS
OTRAS CAUSAS, EDAD 1-4 AÑOS

5. DISMINUCION DE MUERTES por diarrea en los niños egipcios. Se acentuó a partir de 1983, cuando comenzó un programa nacional para promover la utilización de la TRO y se generalizó su uso. Entre 1976 y 1988, las tasas de mortalidad por otras causas apenas cambiaron.

teoría, activando uno o más tipos de estos transportadores, los aminoácidos acelerarían el transporte de sodio, y por tanto de agua, y compensarían sobradamente la "penalización" osmótica mediante la adición de más moléculas pequeñas (los aminoácidos).

Los aminoácidos dotados de una gran afinidad por su transportador son los mejores candidatos. Destaca, de momento, la alanina. Según estudios realizados lo mismo en animales que en humanos, cuando se añade ese aminoácido a la glucosa, aumenta sustancialmente la absorción de sodio y agua y se reduce el volumen de las heces.

Michael Field, de la Universidad de Columbia, sugería otra alternativa en un editorial publicado en el *New England Journal of Medicine* en 1977: sustituir en la TRO estándar la glucosa simple por largas cadenas de almidón o de aminoácidos (proteínas). Su recomendación se basaba en el reconocimiento de que ningún polímero de esos, compuesto potencialmente por cientos de moléculas, tiene el mismo efecto osmótico que una molécula pequeña simple. Almidón y proteínas se transforman, dentro del intestino, en glucosa y aminoácidos, catabolismo que acontece en la superficie de las células de las vellosidades, donde los transportadores captan instantáneamente los productos resultantes. Por tanto, las moléculas pequeñas resultantes no se acumulan en la luz intestinal, ni aumentan la osmolaridad. Por otra parte, el mayor número de moléculas que penetran con el sodio en las células de las vellosidades debe avivar notablemente el movimiento del agua desde el lumen hacia la sangre, menguando en virtud de ello la pérdida de líquidos en las heces.

Dentro de esta segunda opción alternativa para el tratamiento de la diarrea, la investigación se ha centrado en los cereales y las legumbres, cuyas semillas contienen almidón y proteínas. En 1982, F. C. Patra y Mahalanabis, en Calcuta, y, separadamente, A. Majid Molla y uno de los autores (Greenough), en Dhaka, descubrieron que, cuando se sustituía la glucosa de la solución de la TRO por polvo de arroz, la mezcla rehidrataba a los enfermos de cólera. El preparado también reducía el volumen de las heces hasta en un 50%. En otros estudios se conseguían reducciones de entre el 15 y el 49% para otras formas de diarrea, amén de remitir los vómitos. Desde 1982, la sustitución de la glucosa por cereales, legumbres o raíces se ha mostrado igualmente eficaz. Los beneficios se deben, en buena parte, a la presencia de almidón en estos productos, pero es probable que las proteínas contribuyan también, si bien queda pendiente de determinación hasta qué punto intervienen.

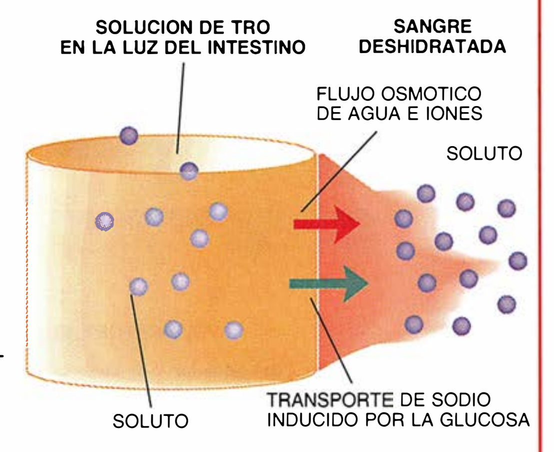
La TRO de base nutricia presenta ventajas indudables, amén de su incidencia en la diarrea. Se puede preparar en casa con productos que resultan agradables para las personas y que pueden adquirir fácilmente a bajo coste. También puede cocinarse, lo que mata los patógenos presentes en el agua (aunque consume energía). De momento, sin embargo, la utilización de la TRO de base nutricia es limitada, por la razón principal de la dificultad que entraña enseñar, a millones de familias, cómo preparar la solución en casa. De ahí que la investigación se decante por

Influjo de la ósmosis en los efectos de las soluciones de rehidratación

Si dos soluciones están separadas por una membrana permeable al agua, ésta fluirá por ósmosis, desde la solución con menor cantidad de moléculas de soluto hacia la que contenga más moléculas, equilibrando así las concentraciones.

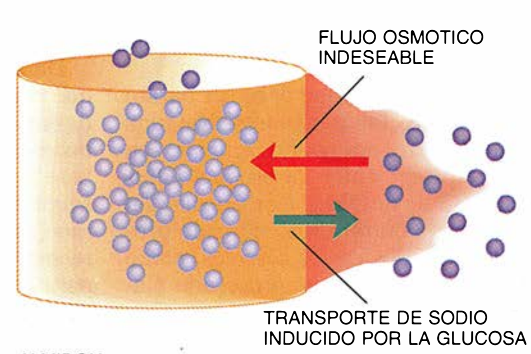
TRO estándar
(su osmolaridad —concentración de moléculas de soluto en una solución— iguala a la osmolaridad normal de la sangre).

EFECTO: El cotransporte de glucosa y sodio induce un flujo osmótico de agua hacia la sangre, que arrastra consigo iones adicionales. La TRO repone el agua, el sodio y otros iones que se pierden de la sangre, pero no reduce la cantidad ni la duración de la diarrea.



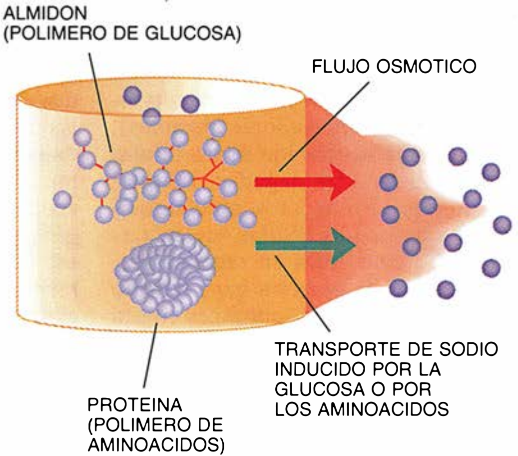
Si se añade glucosa extra
(alta osmolaridad)

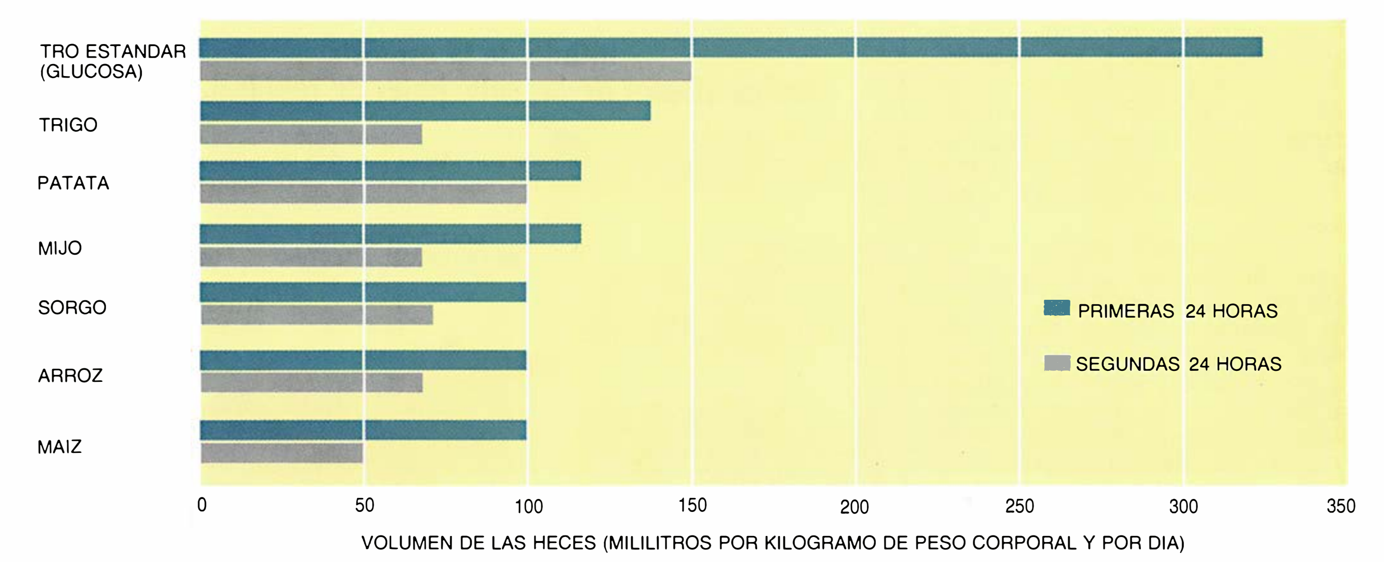
EFECTO: La solución es inaceptable porque el flujo osmótico produce una pérdida neta de agua y iones de la sangre, un fallo osmótico. La deshidratación y el riesgo de morir aumentan.



TRO basada en los alimentos
(baja osmolaridad)

EFECTO: Cada polímero tiene el mismo efecto osmótico que una molécula de glucosa o un aminoácido, pero estimula el transporte de sodio inducido por los nutrientes cuando el polímero se descompone en la superficie de la célula de la vellosidad. La captación rápida en la superficie impide el fallo osmótico. El agua y los iones vuelven a la sangre rápidamente, y menos de la mitad se pierden en la luz intestinal. La cantidad y duración de la diarrea disminuyen.





6. COMPARACION de la TRO estándar y de otras versiones que sustituyen la glucosa por alimentos; se pone de manifiesto que los preparados alternativos reducen el volumen de las heces en los enfermos de cólera (*izquierda*). En otras palabras, los preparados basados en los alimentos aceleran la absorción de líquidos por parte del intestino. (Datos del Centro de Investigación de las Enfermedades Diarreicas).

conseguir un preparado envasado a partir de polvo de arroz en vez de glucosa.

TRO envasado que debe ser barato y estable en climas dispares. Ninguna fórmula ha conseguido igualar, en esos requerimientos, al producto normalizado de la OMS. Comienzan, sin embargo, a entrar en el mercado productos basados en los cereales, como cierta forma de arroz procesado (jarabe de arroz).

La meta soñada sería conseguir un preparado de TRO que, amén de rehidratar a los pacientes y cortar cuanto antes la diarrea (utilizando todos los cotransportadores posibles), estimulara la sustitución de las células de las vellosidades dañadas, lesiones causadas por los agentes infectantes y por el ayuno. Las células suelen tardar tres o cinco días en regenerarse, a no ser que la persona haya sufrido un proceso diarreico; entonces cuesta mucho más.

Las deficiencias en la absorción persisten más allá de la infección propiamente dicha; ello significa que continúa, también, el derroche de nutrientes, culpable de la pérdida de peso y de la malnutrición. Reparando la mucosa intestinal y mejorando rápidamente la absorción, una TRO óptima no sólo salvaría vidas, sino que mejoraría la salud de los supervivientes.

La experimentación con animales ha puesto de manifiesto que ciertos aminoácidos estimulan la formación de células en la mucosa intestinal y que los hidratos de carbono aportan la energía que aquéllas necesitan. Se trata de hallazgos importantes, pero el estudio debe proseguir hasta determinar la combinación ideal de proteínas y almidón.

De acuerdo con otros trabajos, hay que estimular a los pacientes a comer durante la enfermedad, se les administre la TRO estándar o la TRO de base nutricia. Deben recibir los nutrientes esenciales y suficientes calorías (energía); empezarán a comer, se recomienda, en cuanto tengan fuerzas para colaborar. Afortunadamente, la TRO ayuda a restablecer rápidamente el apetito.

Se han medido las ventajas de combinar la TRO estándar con una alimentación regular, y se ha observado que en los niños remite el volumen de las heces y se acorta la duración de la diarrea. Abundando en esto, hace ya más de diez años se vio, en estudios acometidos en Filipinas, Irán, Turquía y Estados Unidos, que la TRO estándar complementada con una alimentación continuada rica en calorías evitaba la pérdida de peso en los niños con diarrea.

Esa línea de investigación sugiere que los alimentos protegen la integridad del intestino. Corroboran la falsedad, casi absoluta, de la opinión popular de que hay que dejar "descansar a la tripa", reduciendo el consumo de alimentos durante la diarrea. Los alimentos seleccionados deben contener almidón y proteínas, que se digieren fácilmente, además de las grasas necesarias para asegurar el consumo de suficientes calorías. (Las grasas contienen más calorías por gramo que las proteínas y el almidón.) En los lactantes, la leche materna es siempre lo mejor.

Es obvio que el primer paso a dar consiste en evitar las causas de la diarrea. Una buena red de alcantarillado, suministro de agua corriente e higiene personal resultan cruciales; en particular, el lavado de las manos con agua y jabón. En el plano médico, se están desarrollando vacunas contra los agentes específicos responsables de la diarrea. Sin embargo, antes de que las familias puedan confiar en estas medidas indirectas, necesitan que sus hijos, que se encuentran enfermos hoy, se recuperen. La terapia de rehidratación oral lo consigue, a veces de manera espectacular.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE TREATMENT OF ACUTE DIARRHEA IN CHILDREN: AN HISTORICAL AND PHYSIOLOGICAL PERSPECTIVE. Norbert Hirschhorn en *American Journal of Clinical Nutrition*, vol. 33, n.° 3, págs. 637-663; marzo de 1980.

EFFECT OF DIARRHOEAL DISEASE CONTROL ON INFANT AND CHILDHOOD MORTALITY IN EGYPT. M. El-Rafie, W. A. Hassouna, N. Hirschhorn, S. Loza, P. Miller, A. Nagaty, S. Nasser, S. Riyad en *Lancet*, vol. 335, n.° 8685, págs. 334-338; 10 de febrero de 1990.

CEREAL BASED ORAL REHYDRATION THERAPY FOR DIARRHOEA: REPORT OF AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM, NOVEMBER 12-14, 1989. Dirigido por K. Elliot, K. Attawell, R. Wilson, N. Hirschhorn, W. B. Greenough III y Khin-Maung-U, Geneva, Fundación Aga Khan y Columbia, Md. International Child Health Foundation, febrero de 1990.

ORAL REHYDRATION THERAPY. William B. Greenough III y Khin-Maung-U en *Diarrheal Diseases*. Dirigido por Michael Field. Elsevier, 1991.

MANAGEMENT OF ACUTE DIARRHEAL DISEASE. Dirigido por Fima Lifschitz. *Journal of Pediatrics*, vol. 118, Suplemento; abril de 1991.

Alones

En mecánica cuántica, las partículas indistinguibles están sujetas a interacciones especiales. La investigación reciente acaba de revelar la existencia de una abundante clase de posibilidades: los alones

Frank Wilczek

Una de las consecuencias más sorprendentes, profundas y bellas de la mecánica cuántica estriba en que confiere un significado nuevo y decisivo a las reglas que gobiernan las partículas y objetos que son exactamente idénticos. Las partículas indistinguibles se hallan sujetas a importantes interacciones especiales, que no se dan en otros casos, por muy parecidas que sean las partículas en cuestión. Estas interacciones especiales se muestran intensamente atractivas en los bosones, e intensamente repulsivas en otra clase de partículas, la de los fermiones.

Bosones y fermiones se conocían desde los primeros pasos de la mecánica cuántica. Creíase, hasta hace poco, que constituían las únicas clases posibles de partículas idénticas. Algunos manuales de mecánica cuántica van más allá e incluyen "demostraciones" de este "hecho".

Un examen crítico de los fundamentos de la mecánica cuántica de las partículas indistinguibles revela, en cambio, que existen otras posibilidades consolidadas. Hay, de hecho, una gama continua de posibilidades, en la que fermiones y bosones aparecen como casos especiales. En el caso general, las partículas se llaman "alones".

Los físicos, pocos, que se ocuparon en un comienzo de los alones, los consideraron meras curiosidades matemáticas. La investigación posterior descubrió su presencia en modelos teóricos que se parecían mucho a los utilizados para describir sistemas y materiales reales. El estudio centrado en ellos puso también de manifiesto la profundidad y coherencia interna del concepto de alones. A pesar de todo, constituyó una sorpresa para mí el descubrimiento, en 1983, de algunas percepciones bastante tangibles de los alones. Son éstos excitaciones básicas de ciertos estados espectaculares de la materia conocidos por estados Hall cuánticos fraccionarios [véase "El efecto Hall cuántico", por Bertrand I. Halperin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1986]. La conciencia de ese fenómeno condujo a una más profunda comprensión de varios aspectos del propio efecto Hall cuántico y despertó el interés de los físicos.

Somos ya bastantes los que pensamos que ese ejemplo, con todo lo impresionante que es, constituye sólo el comienzo. Los alones proporcionan un nuevo paradigma del comportamiento de la materia en la mecánica cuántica y, si hay justicia en el mundo, muchos otros fenómenos aguardan su descubrimiento. Resulta especialmente intrigante la existencia de un mecanismo natural y potente de superconductividad que está relacionado con los alones. Contando con esa propiedad se ha construido incluso una teoría de superconductividad a altas temperaturas. Podría aplicarse a los superconductores de óxido de cobre de reciente fama.

En este artículo expondré el razonamiento lógico que conduce a la noción de alones, las situaciones en que sabemos de su presencia y los mecanismos de superconductividad que sugieren.

No podemos hablar de alones sin conocer los fermiones y los bosones. Adelantaré, pues, una explicación breve y algo heterodoxa de la naturaleza de estas dos clases de partículas. No me detendré en justificar el papel de los bosones, su comportamiento, en sistemas muy dispares y que van desde la superfluidez hasta el funcionamiento de un láser. Ni recordaré que es imprescindible entender la naturaleza de los fermiones para dominar la tabla periódica y apreciar la estabilidad de las enanas blancas, una clase de estrellas. Me centraré, por contra, en el examen crítico de conceptos fundamentales involucrados en las circunstancias más sencillas posibles, a fin de dar paso a los alones.

Empecemos con algunos experimentos teóricos que sólo son ligeras idealizaciones de experimentos reales. Se refieren aquéllos al comportamiento de dos clases de átomos de helio: ^{3}He y ^{4}He, que se distinguen por la naturaleza de sus núcleos. El núcleo de ^{3}He contiene dos protones y un neutrón; el de ^{4}He, dos protones y dos neutrones. Ambos núcleos poseen, pues, el mismo número de protones, lo que indica que presentarán la misma carga eléctrica. Por consiguiente, las propiedades eléctricas de los núcleos serán casi idénticas. Ahora bien, las propiedades eléctricas constituyen, con mucho, el factor

FRANK WILCZEK es profesor de la Escuela Superior de Ciencias Naturales, adscrita al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, N. J. Autor de numerosos artículos sobre física teórica se le conoce, entre otras razones, por el descubrimiento de la libertad asintótica, el desarrollo de la cromodinámica cuántica, la invención de los axiones y el descubrimiento y la explotación de nuevas formas de estadísticas cuánticas (alones). Es miembro de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos.

NOTA DEL EDITOR: Introducimos el neologismo "alones" en sustitución del barbarismo inglés "anyones", ampliamente extendido. El término, creado tras la acostumbrada consulta a expertos en historia de la ciencia, filología clásica y mecánica cuántica, el traductor entre ellos, se ha construido a partir del griego ἄλλος (otro, distinto) y ὄν (el ser). La nueva palabra guarda simetría de significado con otras de idéntico origen: alotropía (existencia de un elemento en dos o más formas diferentes), alomorfismo, etcétera.

más importante para determinar las interacciones entre núcleos y electrones envolventes y, por ende, las propiedades químicas del átomo; en consecuencia, los átomos de ^{3}He y ^{4}He tendrán, casi exactamente, las mismas propiedades químicas.

Podemos comprobarlo. Consideremos una partícula que no sea ni ^{3}He ni ^{4}He; llamémosla *X*, que lo mismo represente un átomo de hierro, una molécula de agua o una hebra de ADN. Para observar si *X* interacciona igual con ^{3}He que con ^{4}He, se provoca su colisión por separado con cada una de ellos y se cotejan los resultados. A esos experimentos de colisión suelen recurrir los físicos para desentrañar las propiedades de las partículas.

Imaginemos que provocamos el choque entre átomos de ^{3}He y partículas *X*. Siempre que estas partículas no se muevan demasiado deprisa, sobrevivirán intactas a la colisión, desviándose un cierto ángulo. Tras observar y anotar muchas colisiones, podemos calcular la distribución de probabilidades: aquellas que corresponden a los distintos ángulos (o grados de desviación) tomados por las partículas que emergen de las colisiones. Esa distribución encierra muchísima información relativa a la naturaleza de la interacción entre los átomos.

Repitamos el experimento mental, ahora con el ^{4}He. Veremos que, con independencia de lo que simbolice *X*, hay muy poca diferencia en el resultado de sus colisiones con ^{3}He y con ^{4}He. La probabilidad de desviarse cierto ángulo es la misma en ambos casos. Resultados que cabía esperar, ya que las fuerzas más importantes son las eléctricas, y las propiedades eléctricas de los átomos de ^{3}He y ^{4}He son casi idénticas. Pero sucede algo distinto, algo extraño y maravilloso, si la *X* es un átomo de ^{3}He o de ^{4}He. Obviamente hay tres posibilidades: choque de ^{3}He con ^{3}He, de ^{3}He con ^{4}He y de ^{4}He con ^{4}He. A tenor de los experimentos anteriores, se presumiría idéntico resultado en los tres casos. La realidad, sin embargo, es muy distinta.

Los resultados más sorprendentes y más sencillos son los de las partículas desviadas un ángulo de 90 grados. Para observarlos, montemos sobre una mesa dos cañones de partículas y dos detectores. Están situados a modo de cuatro puntos cardinales, enfrentados dos a dos. Cada cañón puede lanzar ^{3}He o ^{4}He; lanzarán las partículas hacia el centro, uno en dirección este y el otro en dirección oeste. Los detectores, colocados al norte y al sur de la región de la colisión, atraparán las partículas que se hayan desviado 90 grados. ¿Cuáles son los resultados?

Se descubre que la probabilidad de colisión a 90 grados es exactamente dos veces mayor para las colisiones entre sendas partículas de ^{4}He que para las colisiones de ^{3}He con ^{4}He; en los choques entre dos partículas de ^{3}He, la probabilidad de colisión a 90 grados se anula. Difícilmente se podrá pedir una demostración más contundente de que se esconde algo especial en la física cuántica de las partículas idénticas.



1. EN LA ESCALERA DE CARACOL encontramos una imagen idónea para explicar distintos aspectos de la física de los alones. La diferencia fundamental entre alones y bosones (o entre alones y fermiones) reside en que no sólo debe llevarse el registro de las partículas que intercambian sus posiciones, sino también de las que dan una vuelta alrededor de otras. La escalera recuerda, asimismo, la distribución de corrientes en un solenoide y el movimiento de las partículas cargadas en campos magnéticos, configuraciones físicas que desempeñan un papel destacado en la teoría de los alones. La escalera, proyectada por Baccio Pontelli, forma parte de la Capilla Sixtina de la Ciudad del Vaticano, en Roma.

Los átomos de ^{4}He son bosones típicos; fermiones típicos, los átomos de ^{3}He. Para entender debidamente su comportamiento, hemos de recordar los principios básicos de mecánica cuántica.

Los ingredientes fundamentales utilizados para describir los procesos mecánico-cuánticos son números complejos conocidos como amplitudes. (Los lectores que no estén familiarizados con los números complejos encontrarán una breve, y espero que asequible, descripción de los mismos en el recuadro adjunto.) En cuanto número complejo, la amplitud posee módulo y fase. El cálculo de la probabilidad del proceso exige elevar al cuadrado el módulo de su amplitud.

Podemos enunciar ya el principio fundamental de la mecánica cuántica, el principio de superposición: para calcular la amplitud total de un proceso que puede haber ocurrido de formas distintas, debemos sumar las amplitudes de dichas formas. Por lo común, la *probabilidad* de lograr un determinado resultado es la suma de las *probabilidades* de conseguirlo a través de las distintas vías. (Por ejemplo, la probabilidad de que en la tirada de un dado saquemos o bien un 5 o bien un 6 es la suma de las probabilidades de sacar, por separado, un 5 o un 6.) En la mecánica cuántica, en cambio, sumamos las amplitudes. Este no es el lugar de decir más sobre el principio de superposición. Lo daremos por supuesto y consideraremos las consecuencias.

Retornemos a nuestros experimentos mentales, armados ya con la noción de amplitudes. Atendamos primero a las colisiones entre átomos de ^{4}He que corren hacia el oeste y átomos de ^{3}He en dirección este. Para calcular la amplitud total del caso en que la partícula de ^{4}He pasa del cañón al detector del norte, se suman las amplitudes de todas las trayectorias posibles que conducen a un mismo resultado final: el átomo de ^{4}He estimula al detector del norte. La probabilidad es el cuadrado de esta amplitud suma. Podemos aplicar el mismo método al caso del ^{3}He. En virtud de la simetría de la situación, y debido a que las fuerzas importantes son las mismas, las probabilidades de llegada del ^{4}He y del ^{3}He son las mismas. Así, la probabilidad de que *algo* llegue al detector norteño duplica exactamente la probabilidad de que llegue el ^{4}He o el ^{3}He.

Consideremos ahora las colisiones en que las partículas que salen hacia su mutuo encuentro son átomos de ^{4}He. Tenemos, en esa situación, las amplitudes de dos procesos: el átomo que va hacia el este y se dirige al detector del norte y el que va hacia el oeste y también se dirige hacia el norte; procesos que conducen al mismo resultado final y que no es otro que "el ^{4}He llega al detector del norte". Entra, pues, en juego el principio de superposición, que nos dice que tenemos que sumar las amplitudes de todas las maneras por las que se llegue a un resultado determinado. El hecho de que ahora debamos sumar las amplitudes y no las probabilidades constituye la diferencia decisiva entre los procesos que implican partículas indistinguibles y los que se desarrollan con partículas distinguibles.

Por mor de la simetría de la situación, las amplitudes correspondientes a la llegada al detector norte saliendo del cañón del este o del cañón del oeste son las mismas. De acuerdo con el principio de superposición, sumamos estas amplitudes para obtener la amplitud total del proceso de colisión, que es, por tanto, dos veces la amplitud de cualquiera de los conjuntos de trayectorias. La probabilidad de que una partícula de ^{4}He incida en el detector es, pues, el cuadrado del módulo de la amplitud total, que es igual a cuatro veces la probabilidad de cada conjunto de trayectorias. Este resultado es el doble de lo que encontramos para la frecuencia total de llegadas al detector norte en el caso de colisiones entre átomos de ^{3}He con átomos de ^{4}He; lo confirman los resultados experimentales.

¿Y qué decir del resultado más sorprendente de todos: la anulación de toda probabilidad de desviación en 90 grados para los choques entre átomos de ^{3}He? ¿Cómo dejar en suspenso la argumentación precedente que llevaba a una probabilidad aumentada (en vez de anularla) para partículas indistinguibles? Hemos de modificar la regla de combinación de las amplitudes del este y del oeste. La modificación requerida, aunque sencilla, puede parecer extraña y *ad hoc*. Dice así la regla modificada: para los fermiones, de los que el ^{3}He es un ejemplo, hemos de restar las amplitudes de las trayectorias cuando las partículas se han intercambiado. Puesto que las amplitudes de llegada al norte, se salga del este o se salga del oeste, son iguales, la regla reformada dará una amplitud total nula y, por tanto, una probabilidad cero de llegada al detector norte.

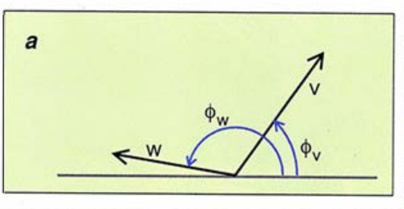
Y eso es, a grandes rasgos, lo que hay en la estadística cuántica tradicional de bosones y fermiones. Todo lo demás se deduce de estas reglas básicas. En resumen: existen dos clases posibles de partículas idénticas, bosones y fermiones; para los bosones (como el ^{4}He) simplemente se suman las amplitudes de todas las maneras de obtener el resultado final; para los

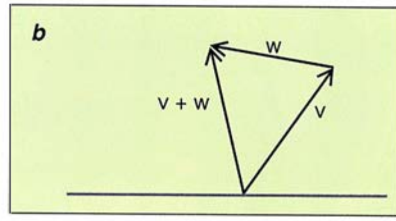
Números complejos

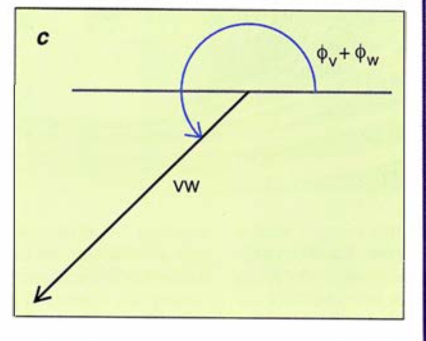
Así como los números reales pueden representarse mediante desplazamientos a lo largo de una línea, así también los números complejos pueden hacerlo mediante desplazamientos en un plano. Las flechas designadas por **v** y **w** en la ilustración ***a*** representan dos números complejos.

Cada número complejo tiene un módulo (la longitud de la flecha) y una fase (la dirección de la flecha). Con ese recurso, podemos representar fácilmente la adición y la multiplicación de números complejos. Para sumar los dos números complejos **v** y **w** se desplazan las flechas tal como se indica en la ilustración ***b***.

La multiplicación reviste cierta dificultad, según se aprecia en ***c***. El módulo, o longitud, del producto de **v** y **w** es la longitud de **v** por la longitud de **w**. La dirección, o fase, del producto de **v** y **w** se define mediante el ángulo suma del ángulo de la dirección de **v**, ϕ_V, y del ángulo de la dirección de **w**, ϕ_W.



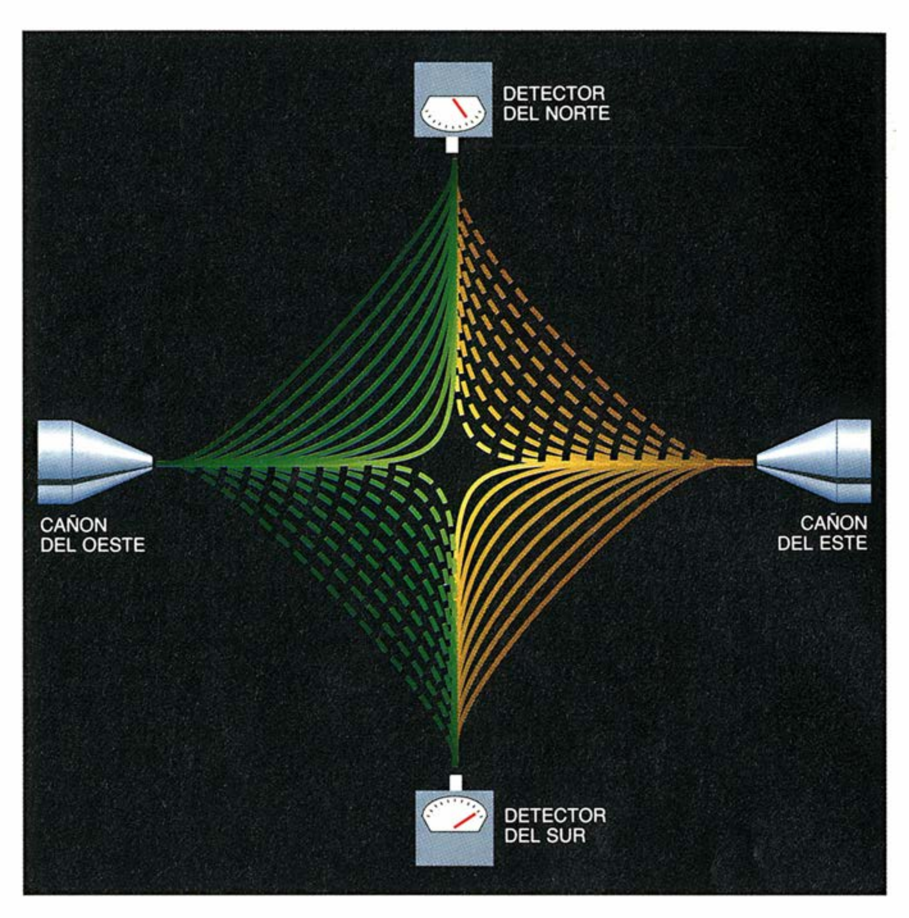




fermiones (como el ^{3}He) se resta si las partículas se han intercambiado.

La regla según la cual hemos de restar las amplitudes de los fermiones exige, por su carácter llamativo, una explicación más profunda. Avanzaremos en esa dirección buscando las "reglas de las reglas." ¿Hay otras, además de las que se aplican a bosones y fermiones? ¿Qué requisitos generales debe satisfacer una norma sobre combinación de amplitudes de partículas idénticas?

La condición fundamental la impone un principio de la mecánica cuántica muy relacionado con el principio de superposición. En estadística se defiende que la probabilidad de dos sucesos consecutivos es la probabilidad de uno multiplicada por la probabilidad del otro (dado el primero). Por ejemplo, la probabilidad de que yo pare un penalty en un partido es la probabilidad de que se lance un penalty por la probabilidad de que, si se lanza, lo pare. En nuestro análisis del principio de superposición dijimos que las reglas habituales de sumar probabilidades se sustituyen, en mecánica cuántica, por reglas de sumar amplitudes. No debiera, pues, sorprendernos que la regla de multiplicar probabilidades de sucesos consecutivos se sustituya en mecánica cuántica por la regla de multiplicar las amplitudes parciales de cada paso de la secuencia, para calcular la amplitud total de una secuencia de sucesos.



2. EXPERIMENTO DE DISPERSION para poner de manifiesto el comportamiento mecánico-cuántico de las partículas. Dos cañones, enfrentados, se lanzan mutuamente partículas. Las que se desvían 90 grados se registran en dos detectores. Las líneas continuas indican un conjunto de posibles trayectorias de las partículas desviadas. Las líneas de trazos muestran otro conjunto. Es más probable que las partículas sigan las trayectorias cercanas al centro (*colores brillantes*) que las trayectorias que quedan más alejadas del mismo (*colores apagados*).

Se trata de un regla muy potente. Permite evaluar la amplitud de un proceso de historia complicada a través de otras más sencillas. Se comienza por dividir el proceso en varios sucesos que ocurran en intervalos de tiempo pequeños. Se determina luego la amplitud para cada suceso corto. Por último, se multiplican las amplitudes de todos los sucesos cortos para así obtener la amplitud de la historia completa. La consistencia de este enfoque deriva, en parte, de que, para tiempos muy cortos, las partículas se comportan de acuerdo con las leyes de la mecánica clásica. Así, descomponiendo y reconstruyendo las trayectorias, podemos determinar la regla mecánico-cuántica de las amplitudes a partir, casi exclusivamente, de las fuerzas y las interacciones clásicas.

Ahora bien, ciertos procesos no pueden segmentarse en secuencia de cambios pequeños. No podemos entonces apelar a la regla de multiplicar las amplitudes, ni viene en nuestro auxilio la mecánica clásica. Ocurre así con el experimento de la colisión entre helio y átomos indistinguibles. En dicho experimento, las trayectorias que conducen a una llegada al norte se dividen en dos clases; a saber, las que salen del este y las que proceden del oeste. En el seno de cada clase, todas las trayectorias se hallan relacionadas por cambios pequeños. Entre clases, sin embargo, las trayectorias se relacionan por un cambio grande: la partícula que llega es completamente distinta. Por consiguiente, la amplitud relativa de estas trayectorias no puede determinarse a partir de una amplitud para trayectorias muy pequeñas; no está determinada por el comportamiento de las partículas en el límite clásico.

Si no existiera el límite clásico para guiarnos, daría la impresión de que nos enfrentamos a un derroche de posibilidades: cualquier amplitud parecería posible. Para nuestra fortuna, las posibilidades están acotadas, ya que las amplitudes de trayectorias topológicamente distintas (es decir, trayectorias que no pueden deformarse continuamente unas en otras) deben respetar los principios generales de la mecánica cuántica. En particular, las amplitudes deben guardar coherencia con el principio según el cual las amplitudes de sucesos consecutivos son los productos de las amplitudes de los subsucesos de la secuencia.

Para percibir la potencia de esta condición, veamos su aplicación a una secuencia de dos procesos de intercambio. Si dos partículas intercambian la posición para, a continuación, cambiarla de nuevo, es como si no hubiera ocurrido absolutamente nada. En esa misma línea argumentativa, cuando multiplicamos por algún factor de intercambio y después multiplicamos de nuevo por el factor, el resultado total será el mismo que si hubiéramos multiplicado por 1. En otras palabras, el cuadrado del factor de cambio debe ser igual a 1. Nos quedan sólo dos posibilidades matemáticas: el factor debe ser 1 o -1. En consecuencia, o sumamos las amplitudes cuando las partículas se intercambian, o las restamos. Ni más ni menos que lo que acontece con bosones y fermiones. Ambos casos se han observado en la naturaleza, tal como hemos visto.

Pero, ¿es éste el final de la historia? Si fuera verdad que las dos únicas clases de trayectorias sin conexión fueran las correspondientes a partículas que intercambiaran su identidad, no

habría más que añadir. Pero no es en absoluto obvio que no existan otras diferencias discontinuas entre las trayectorias.

Consideremos, a modo de ejemplo, las trayectorias que se entrelazan una alrededor de otra un determinado número de veces, como en la figura 3. Al ser entero el número de vueltas, para cambiarlo tendremos que hacerlo en un número entero también, es decir, habrá que operar un salto discreto. Por tanto, los cambios continuos en la trayectoria, que no introduzcan saltos, no pueden alterar en absoluto el número de vueltas. ¿Se modifica, con esa posibilidad de cambiar el número de vueltas, la clasificación de las trayectorias, aportando nuevas posibilidades a la estadística cuántica?

En tres dimensiones espaciales, la respuesta es que no. Para comprobarlo, situémonos en la posición privilegiada desde donde una partícula ve la otra. En el transcurso del movimiento, la posición relativa de la otra partícula describe una curva en el espacio. Pero podemos imaginar la curva reducida a un punto, de suerte tal que la curva nunca supere nuestra posición privilegiada. De forma similar, podrá deshacerse cualquier vuelta aparente, con independencia de la complicación que encierre. La trayectoria original, enrevesada, guarda relación continua con otra trivial.

En dos dimensiones, la situación difiere. La trayectoria de una partícula puede rodear nuestra posición privilegiada. Si lo hace, ya no puede reducirse sin pasar por nuestra posición. Por tanto, la trayectoria sólo puede relacionarse con otra trivial mediante un cambio discontinuo, es decir, un salto discreto sobre la partícula situada en nuestra posición privilegiada. La trayectoria puede rodear nuestra posición repetidamente, ya sea en el sentido de las agujas del reloj o sea en sentido antihorario. Las trayectorias que consten de distintos números totales de vueltas no pueden mantener una mutua relación continua.

Armados de este conocimiento, reexaminemos el argumento que nos llevó a la conclusión de que los bosones y los fermiones constituían las únicas formas coherentes de reglas para la interacción entre partículas idénticas. El razonamiento se basaba en que, si se realizaba un cambio de identidad después de otro, el resultado podía deformarse sin cesar y convertirlo en una trayectoria trivial desenredada. Ahora bien, en dos dimensiones, ni siquiera determinadas trayectorias que no implican cambios de identidad pueden desenredarse del todo; abundando en esto, no se puede desligar una trayectoria bidimensional en la que las partículas se entrelazan. Si hay vueltas, debemos ser más cuidadosos acerca de cómo formulamos las "reglas de las reglas."

¿Cuál es la relación entre intercambio y entrelazado? En cierto sentido, un intercambio puede considerarse media vuelta. Para comprobarlo, fijémonos en determinada forma de operar el intercambio. Dejemos que dos partículas giren en sentido horario alrededor de su punto medio hasta que cada una ocupe la posición original de la otra. El resultado es un intercambio de identidad. Iterémoslo. Las partículas tornan a hallarse en sus puntos de partida, tras haberse rodeado, una vez, mutuamente. Por tanto, una sucesión de dos intercambios da una trayectoria con justo una vuelta, que no puede deformarse en una trayectoria trivial desenredada; al menos no se puede en dos dimensiones. Y así deja de tener sentido la exigencia de que el cuadrado del factor de un intercambio sea simplemente 1. La verdad es que ese factor puede ser cualquier número complejo. Por conveniencia, diré que β es el número complejo que multiplica la amplitud en un intercambio en la dirección de las agujas del reloj. La amplitud de una vuelta completa en dirección horaria será entonces β^2; para dos vueltas, la amplitud será β^4, y así sucesivamente. No se requiere que β sea 1 (como para los bosones) o -1 (como para los fermiones). Los bosones y los fermiones constituyen, sencillamente, dos casos extremos; hay, entre ambos, una continuidad de posibilidades. Con la palabra "alones" queremos evidenciar esa pluralidad.

¿Cómo hemos de abordar un proceso mecánico-cuántico que implique más de dos alones? Las reglas para las amplitudes de los procesos que tratan con muchas partículas idénticas pueden deducirse de las que operan con sólo dos partículas. Para los bosones, basta con sumar las amplitudes. Para los fermiones, contamos el número total de intercambios de identidad, multiplicamos luego por -1 las trayectorias con un número impar de intercambios y, por último, sumamos las amplitudes. En el caso general de los alones, sumaremos el número total de vueltas sobre todos los pares, lo multiplicaremos después por β elevada a la potencia adecuada y, de nuevo, sumaremos las amplitudes.

Hagamos una síntesis de los resultados de nuestro reexamen de los fun-

3. PARTICULAS INDISTINGUIBLES cambian su posición dos veces sucesivas al desplazarse en el tiempo y en el espacio. El resultado final es un proceso sin cambio. Mirando desde la partícula *a* hacia la partícula *b*, las posiciones relativas describen una curva cerrada en el espacio (*derecha*).

damentos de la mecánica cuántica de las partículas idénticas. En tres dimensiones, hemos comprendido la razón de que bosones y fermiones constituyan las únicas posibilidades. En dos dimensiones, no son las únicas posibilidades; entre ambos extremos, tenemos un continuo de nuevas posibilidades, los alones.

Tras este viaje intelectual un tanto árido, la meta a que hemos arribado pudiera parecer frustrante. Después de todo, el mundo real es tridimensional y la existencia de posibilidades exóticas de partículas idénticas en Planilandia pertenece, diríase, al dominio de la lucubración académica. Lo cierto es que los alones encierran especial importancia en el mundo real, sobre todo en la descripción de algunos de los estados más interesantes de la materia. ¿Cómo puede ser eso? Porque, bajo determinadas circunstancias, la materia se comporta como si fuera bidimensional.

Circunstancias de ese tenor se producen cuando se describen capas superficiales cuyo espesor es de un solo átomo, o de unos pocos; cuando hablamos de superconductores de alta temperatura de grafito o de óxido de cobre, materiales que están formados por planos de átomos apilados unos sobre otros; o cuando, así en el efecto Hall cuántico, consideramos electrones confinados en un plano mediante campos eléctricos. En todos los casos aducidos, los estados del movimiento en la dirección transversal están cuantificados, lo que significa que hace falta una cantidad de energía finita para excitarlos. A bajas temperaturas, no hay energía disponible para excitarlos, y se hace obligado apelar a una descripción bidimensional.

Ni que decir tiene que electrones o fotones podrán escapar de cualquier Planilandia, amén de exigírseles, en el nivel fundamental (a altas energías y en el vacío), que sean bosones o fermiones. Pero nadie recurre a aquellas partículas para dar una explicación directa y propia del comportamiento de baja energía de un material cualquiera. En un material, un electrón ejerce fuerzas sobre los otros constituyentes y crea una pequeña bolsa de perturbación en su vecindad. Las excitaciones básicas que se producen en un material podrían no comportarse en absoluto como los electrones u otras partículas elementales en el vacío. De ahí que se les llama cuasipartículas. Cabe esperar que, en materiales bidimensionales, las cuasipartículas sean, a veces, alones.

Para que aparezcan los alones, estos materiales deben también satisfacer otra exigencia sutil e importante. La definición de los alones incluye el factor β, que se asocia con una vuelta en sentido horario. Por coherencia, asociaremos un factor β^{-1} a una vuelta en sentido antihorario. Pero las vueltas en un sentido y otro están relacionadas por reflexiones especulares. Las vueltas en sentido antihorario son equivalentes a las vueltas opuestas vistas a través del espejo, una relación que, en física, denominamos transformación de paridad. De modo similar, si las vueltas en sentido antihorario sufren una inversión temporal, se manifiestan como vueltas en sentido horario. En la inmensa mayoría de los casos, ni la paridad ni la inversión temporal afectan o alteran la forma de las leyes fundamentales de la física. El mundo que usted ve reflejado en un espejo, o cuando mira una película que procede del final al principio, obedece las mismas leyes fundamentales de la física (en una buena aproximación) que el mundo real.

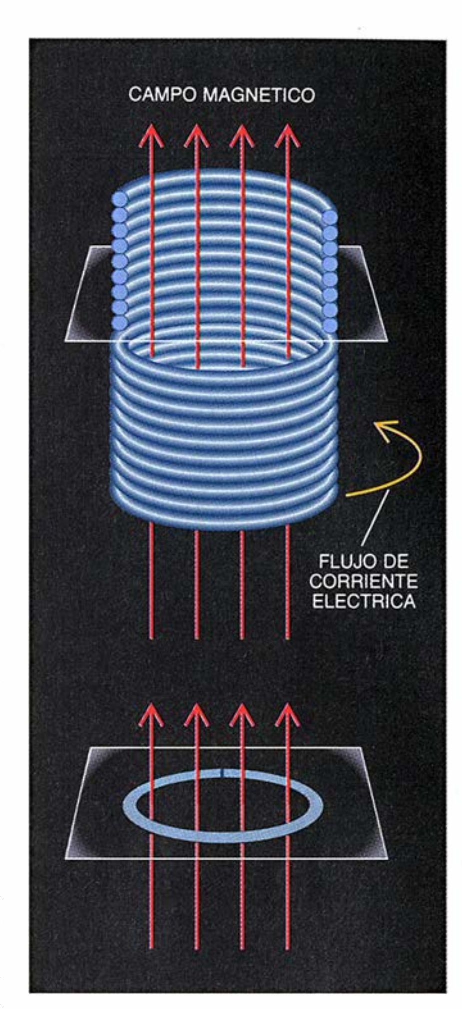
Si aceptamos que la simetría bajo las transformaciones de paridad y de inversión temporal se mantiene en un material, deberemos concluir que las cuasipartículas que se arrollan mutuamente en sentido horario poseerán la misma amplitud que las partículas que lo hagan en sentido antihorario y, por tanto, que β habrá de ser igual a β^{-1}. Esta ecuación obliga a que β sea igual a 1 o a -1, lo que nos lleva otra vez a los bosones y los fermiones.

Afortunadamente, esta exigencia resulta ser menos restrictiva de lo que parece. Aunque las leyes básicas de la física en su mayor parte no cambian bajo las transformaciones de paridad y de inversión temporal, sí pueden hacerlo los materiales y algunas situaciones concretas; en efecto, la presencia de un campo magnético, o una rotación, destruye ambas simetrías.

Vemos, pues, que no son insuperables los escollos más claros contra la existencia de los alones. Antes bien, el abordar esos obstáculos ayuda a encauzar la investigación: los alones deben ser cuasipartículas en materiales bidimensionales que violen las simetrías de paridad y de inversión temporal.

Pero, ¿cómo reconoceríamos un alón si lo viéramos? Las partículas, o las cuasipartículas, no se nos presentan con la etiqueta en la frente: "bosón", "fermión" o "yo soy un alón". Si queremos reconocer a los alones, no queda más remedio que descubrir su comportamiento.

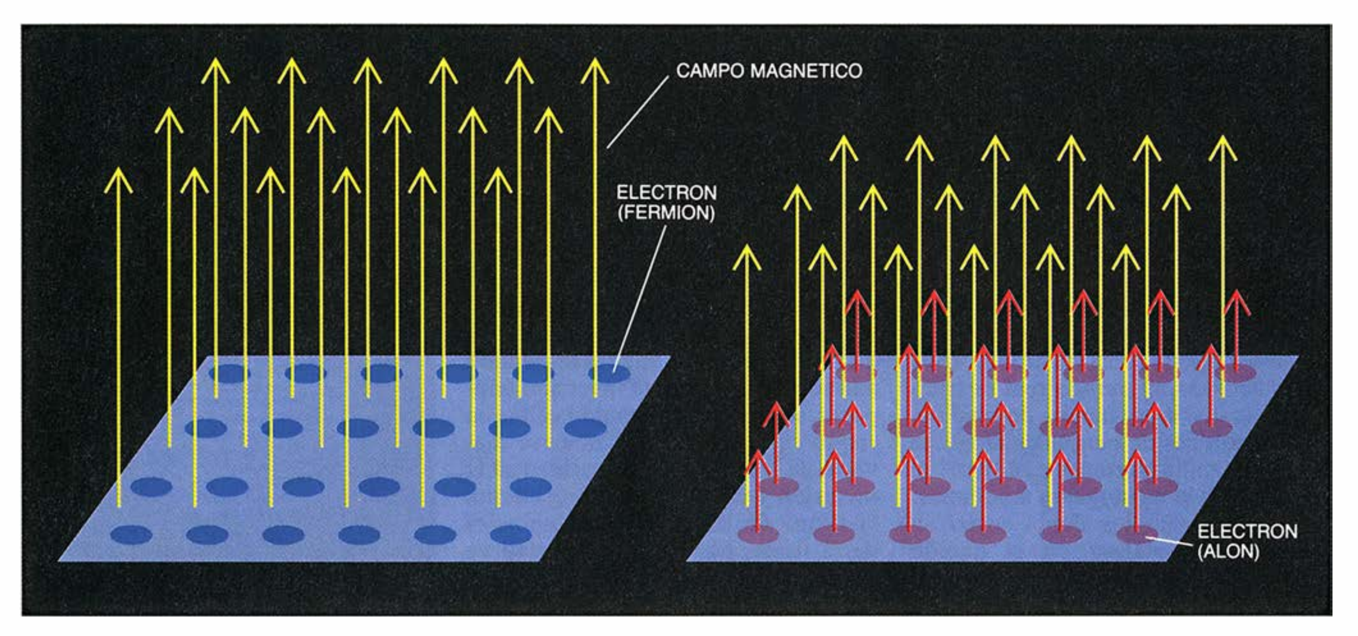
En nuestro empeño por conocer un objeto radicalmente nuevo como el alón, constituye un buen ardid intelectual relacionarlos con otros objetos



4. UN SOLENOIDE produce un campo magnético constante en el interior del carrete, pero no en su exterior. Un corte transversal a través del solenoide proporciona una región bidimensional que contiene cierta cuantía de campo magnético o, más exactamente, de flujo.

que nos sean familiares. Para nuestra fortuna, existe un método muy potente para relacionar los alones en general con bosones y fermiones, más accesibles. Gracias a un truco especial, permitido en dos dimensiones, podemos metamorfosear los alones en bosones o fermiones, y a la inversa; truco que se vale de hábiles manipulaciones de campos magnéticos imaginarios. Se trata de la técnica de transmutación estadística, alquimia ésta muy importante en la teoría y la práctica de la física de los alones.

¿Cómo opera la transmutación estadística? Quizás el lector esté familiarizado con el comportamiento de un largo solenoide, que no es ni más ni menos que un carrete de alambre. Cuando fluye una corriente por el solenoide, aparece un campo magnético constante (proporcional a la corriente) en el interior del mismo; fuera del carrete no se crea ningún campo magnético. Para generar la versión bidimensional de un solenoide, tomemos



5. LA TRANSMUTACION ESTADISTICA puede aparecer cuando en dos dimensiones los electrones encuentran un campo magnético. Cada electrón puede "absorber" una cierta cantidad de campo (*rojo*); en el proceso, los electrones pueden transformarse de fermiones en alones.

una sección plana del dispositivo, perpendicular al eje del solenoide. Obtenemos así que, en dos dimensiones y en una pequeña región, podemos encerrar un campo magnético. Esta configuración recibe el nombre de punto de flujo; se genera sin dificultad en condiciones muy dispares. (El flujo, una medida cuantitativa de la intensidad global de una distribución de campo magnético, es igual al producto de la intensidad del campo magnético por el área que ocupa.)

Desde el punto de vista de la física clásica, el punto de flujo carece de interés. Una partícula cargada no sufrirá la acción de ningún campo magnético ni experimentará ninguna fuerza a menos que lo atraviese, lo que es muy improbable. En mecánica cuántica encontramos una situación completamente distinta. La amplitud de una partícula cargada que rodee a un punto de flujo queda multiplicada por un factor β, muy parecido al factor expuesto a propósito de la estadística cuántica. En un proceso en el que la carga ciña n veces el punto de flujo, la amplitud queda multiplicada por un factor β elevado a la potencia n. La fase de β es proporcional a la carga y al flujo. Por lo demás, los puntos de flujo no ejercen ningún efecto sobre las otras partículas.

Asociando, pues, una cantidad determinada de carga y de flujo a cada miembro de un conjunto de partículas idénticas, se produce el mismo efecto que alterando la estadística cuántica de dichas partículas. En eso se compendia la esencia de la transmutación estadística. Nos permite representar una clase de alón a través de otro tipo de alón con una carga y un flujo asociados, aunque arbitrarios.

En presencia del flujo y la carga podría esperarse que se produjera la transmutación estadística. Así acontece en los superconductores de tipo II. Cuando se expone una capa fina de esta clase de superconductor a un campo magnético, el campo penetra en regiones acotadas. Por mor de simplificación, reduzcamos teóricamente cada región de ésas a un punto de flujo. Y admitamos la asociación de un electrón con ese punto. Obtenemos, entonces, una carga ligada a un flujo y, nada lo impide, podría producirse la transmutación estadística.

Para un superconductor estándar, la cantidad de flujo a través de un punto de flujo resulta suficiente para transmutar, de fermión a bosón, la estadística de un electrón. Mientras el electrón libre es un fermión, el electrón ligado a un punto de flujo se comporta como bosón.

Razones diversas podrían dificultar la observación de la transmutación estadística de los puntos de flujo en superconductores ordinarios de tipo II. Ahora bien, la física subyacente guarda una estrecha relación con una forma (en mi opinión, la mejor) de entender el efecto Hall cuántico fraccionario (EHCF). Por desgracia, un examen en profundidad de ese fenómeno supera el marco de este artículo. Suprimiendo de manera bastante burda muchos aspectos fascinantes y ramificaciones técnicas del EHCF, daré algunos trazos de su naturaleza.

Los lectores recordarán que ciertos átomos que contienen determinados números de electrones se ven favorecidos desde el punto de vista energético y son estables (lo que lleva a la existencia de elementos inertes o gases nobles). En ese orden, para ciertas densidades, el gas de electrones bidimensional en un campo magnético se muestra especialmente estable. Con mayor precisión, y esto es muy importante, el factor crucial estriba en la razón de densidad a campo magnético aplicado. Esa proporción se denomina factor de llenado. Para los factores de llenado preferidos, los electrones, que suelen comportarse como un gas, se acercan a la conducta de los líquidos, oponiéndose a los cambios de densidad.

Contamos con un camino directo para entender la existencia de uno de los factores de llenado preferidos; viene a ser como explicar las capas completas de los átomos de un gas inerte. Nos referimos al factor de llenado que acostumbra denominarse 1; en este caso se trata del efecto Hall cuántico entero. En 1983 se descubrió, con sorpresa universal, que también se prefieren otros valores fraccionarios discretos del factor de llenado; por ejemplo, el tercio exacto del valor preferido obvio. Para estos valores el gas de electrones se convierte en un líquido. Esto es el EHCF.

Hay una manera atractiva de explicar ese efecto. Tiene que ver con la física de la transmutación estadística. En el dispositivo experimental utilizado para estudiar el efecto Hall cuántico, los electrones están sometidos

a un campo magnético externo. Los electrones objeto de estudio difieren por completo de los que generan el campo magnético. Pero podemos imaginarnos que los electrones llevan parte del campo magnético, es decir, portan asociados unos puntos de flujo imaginarios. Por consiguiente, los electrones se transmutan en alones. Al propio tiempo, se produce un cambio en la fracción de llenado, es decir, la razón entre la densidad de electrones y el campo magnético externo. (Cambio que obedece a que los electrones "absorben" parte del campo externo.) Por tanto, los electrones originales (que son fermiones), en una fracción de llenado dada, están relacionados con los alones, de una fracción de llenado distinta.

A medida que cada electrón va acopiando más flujo, los electrones se convierten en alones de diversos tipos. Si el proceso avanza mucho en su desarrollo, se torna a los fermiones. Llegado ese momento, nuestra fantasía vuelve a la realidad, ya que nuestro imaginario cambio del campo magnético por flujo ha producido, de nuevo, un estado aceptable para los electrones físicos (es decir, fermiónicos). En el proceso, el valor del campo de fondo se ha cambiado y, con él, el factor de llenado. Este proceso genera, importa destacarlo, estados para los factores de llenado fraccionarios que, de acuerdo con la observación, resultan ser los más favorables.

La teoría de los alones nos permite relacionar dos estados electrónicos especiales, de carácter muy distinto por lo demás; un estado que se conoce bien y otro envuelto en cierto misterio todavía. Nos ayuda también a descubrir el motivo de que los factores de llenado favorecidos sean los que son.

Este recurso a los alones se ha convertido en herramienta intelectual muy cómoda, pero lo mejor está aún por llegar. Los alones aparecen directamente en el EHCF. Según la construcción cuyo esquema me he limitado a describir, en el EHCF los electrones son, en cierta manera, "superfermiones". Si se intercambia un electrón con otro, la fase de la amplitud no sólo cambia en π, lo que siempre se asocia con los fermiones, sino que también (en el caso más sencillo de factor de llenado un tercio) se altera con un 2π extra, lo que se asocia con el flujo absorbido. El cambio total de la fase es, por tanto, 3π. Este hecho abona la idea de que se debe poder definir otra clase de excitación puntual que es, en cierto sentido, equivalente a un tercio de electrón.

La realidad es que se trata de una hipótesis cuya verdad está muy asentada. Las cuasipartículas asociadas con el EHCF de factor de llenado un tercio llevan una tercera parte de la carga del electrón, ¡y una tercera parte de su estadística! En términos matemáticos, cuando una de estas cuasipartículas da una vuelta a otra, la amplitud queda multiplicada por la raíz cúbica de -1. En los estados del EHCF que aparecen para otros factores de llenado, aparecen cuasipartículas que presentan otras clases de estadísticas exóticas de alones.

Es posible que el desarrollo más excitante de la física de alones resida en la reciente observación según la cual les estaría asociado un mecanismo esencialmente nuevo y muy potente de superfluidez y de superconductividad; en ello ha tenido una parte destacada el trabajo de Robert Laughlin, de la Universidad de Stanford.

Caracteriza a un superconductor el que las corrientes eléctricas puedan fluir por él y que su flujo, una vez iniciado, no posea una manera fácil de disiparse. Para mejor entender esa segunda nota distintiva, fijémonos en cómo puede fallar. En un metal ordinario (no superconductor), se establece una corriente cuando muchos electrones se mueven más o menos independientemente en respuesta a un campo eléctrico. Si éste desaparece, los electrones se frenarán cuando choquen entre sí y con los núcleos del metal. De esta manera se disipa el flujo de electrones.

Así, un aspecto fundamental de la superconductividad es el de negar la posibilidad de que las partículas individuales se frenen gradualmente, cediendo energía a otras partículas o a las vibraciones. Pero deben poderse mover. La única manera de reconciliar estas exigencias es aceptando la existencia de un estado aislado que tenga menos energía que cualquier otro, para cada posible valor de la corriente total. Podemos imaginárnoslo como un estado de movimiento correlacionado de todas las partículas, de suerte que se penalice energéticamente la salida de la fila de cualquier partícula. Gasto energético que debe ser mayor que la energía ganada si se frena un poco.

Los estados del efecto Hall cuántico tienen algo de estas características. Para cualquiera de los factores de llenado preferidos se encuentra un estado aislado único de mínima energía en el que el movimiento de todos los electrones está correlacionado. Ahora bien, el efecto Hall cuántico tiene lugar en presencia de un campo mag-

nético de fondo, lo que implica que las partículas cargadas no puedan fluir de manera normal. Por tanto, aunque podría afirmarse que superconducen, los estados Hall cuánticos no presentan las consecuencias más espectaculares de la superconductividad. Pero la idea de la transmutación estadística, bien manejada, nos permite relacionar estos superconductores de mentirijillas con los verdaderos; la idea posibilita el trueque de un campo magnético por la estadística de las partículas. Empecemos con un estado Hall cuántico fraccionario favorecido y canjeemos todo el campo real por flujos ficticios ligados a las partículas, cambiándolas así en alones. El estado resultante no disipa; pero, al no quedar campo real, puede fluir; posee, pues, las dos notas características del superconductor. Tales estados son excelentes candidatos para describir el comportamiento de los materiales cuyas cuasipartículas sean alones de la clase adecuada.

Investigaciones más detalladas, tanto analíticas como numéricas, han mostrado que los estados cuya superfluidez se predice, de acuerdo con esa argumentación cualitativa, resultan serlo en realidad. Ese mecanismo de superconductividad alónica, muy poderoso, funciona aun cuando sean muy repulsivas las otras interacciones de las cuasipartículas.

Comparado con ello, el mecanismo clásico de la superconductividad mediante apareamientos resulta un tanto "exquisito". Exige alguna clase de interacción atractiva neta, lo que no está fácilmente disponible para los electrones, ya que, en la mayoría de los casos, la repulsión de Coulomb entre los electrones constituye la fuerza dominante. En los superconductores ordinarios, un electrón de un par atrae los iones cargados positivamente de su entorno, que se mueven mucho más despacio, y está ausente del lugar cuando el otro electrón del par llega y es atraído por la concentración de carga positiva. Pero todo esto sólo puede funcionar si el cristal no genera excesivo ruido y se hallan separados los electrones de un par. Debido a esas dos exigencias, el mecanismo opera bien sólo a temperaturas bajísimas.

¿Son alónicos los superconductores de alta temperatura de óxido de cobre? Varios indicios generales abonan una respuesta afirmativa. La principal característica que comparten los superconductores de óxido de cobre son los planos bidimensionales de cobre y oxígeno. Estas estructuras bidimensionales presentan una orientación magnética importante, de naturaleza poco conocida, y prometen convertirse en semillero de cuasipartículas alónicas. Además, hay un hecho a resaltar: se trata de materiales que son superconductores a altas temperaturas. Uno presiente que semejante fenómeno sorprendente, raro y cualitativamente nuevo, merece una explicación especial que se relacione con las propiedades fundamentales de los materiales en cuestión.

Pero el criterio último por el que se gobierna la ciencia no descansa en el placer estético que produzcan nuestras teorías, sino en su capacidad para explicar hechos reales. Sólo los experimentos nos aclararán, en definitiva, el significado, para estos materiales, del mecanismo de los alones de la superconductividad a altas temperaturas.

¿Cuáles son los experimentos a considerar? Si los alones residen en los superconductores de óxido de cobre, cabrá entonces esperar que, en estos materiales, estén rotas las simetrías de paridad y de inversión temporal. Hoy, en la fecha de redacción del artículo, el asunto no está claro. Algunos experimentos parecen corroborar la ruptura de las simetrías, en tanto que otros, de pareja precisión, parecen negarlo.

Después de 60 años de fructuoso desarrollo, la teoría de los bosones y los fermiones podría haberse agotado. Los alones proporcionan un nuevo paradigma del comportamiento de la materia en dos dimensiones. Los estados del efecto Hall cuántico fraccionario muestran un interesante cumplimiento de ese paradigma. La experiencia nos ha enseñado que la naturaleza hace abundante uso de cada una de las posibilidades sencillas y sólidas que la mecánica cuántica ofrece para la descripción de la materia. Otras muchas pruebas de la presencia de los alones esperan, ésa es mi confianza, su descubrimiento.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE RELATIONSHIP BETWEEN HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY AND THE FRACTIONAL QUANTUM HALL EFFECT. R. B. Laughlin en *Science*, vol. 242, págs. 525-533; 28 de octubre 1988.

FRACTIONAL STATISTICS AND ANYON SUPERCONDUCTIVITY. Frank Wilczek. World Scientific, 1990.

FRACTIONAL STATISTICS: QUANTUM POSIBILITIES IN TWO DIMENSIONS. G. S. Canright y S. M. Girvin en *Science*, vol. 247, págs. 1197-1205; 9 de marzo de 1990.

THE HUNT FOR ANYONS IN OXIDE SUPERCONDUCTORS IS INCONCLUSIVE. Barbara Goss Levi en *Physics Today*, vol. 44, n.º 2, págs. 17-20, febrero de 1991.

René Jules Dubos

La búsqueda de las influencias medioambientales en los mecanismos de la enfermedad llevó, a este ecólogo puro, a un análisis filosófico de la salud

Carol L. Moberg y Zanvil A. Cohn

A lo largo de su vida, René Dubos pasó de sus trabajos básicos, pioneros en su género, sobre la tuberculosis y la neumonía, a sus investigaciones acerca de un modelo global de la enfermedad, para terminar con sus estudios sobre la salud de la tierra. Uno de los pensadores más influyentes, desde el punto de vista ecológico, del presente siglo, combinó las rigurosas condiciones y las cuidadosas observaciones de un biólogo con las desafiantes opiniones y las infinitas perspectivas de un humanista. Creyó que cualquier organismo vivo —léase microbio, ser humano, sociedad o planeta— sólo podía entenderse en el contexto de las relaciones que mantiene con todo lo demás.

Opinión que fue conformando a partir de su brillante carrera de bacteriólogo y su experiencia personal sobre la salud y la enfermedad. Su enfoque ecológico en la búsqueda de nuevos fármacos le llevó al descubrimiento de la gramicidina, el primer antibiótico clínicamente útil. Este mismo acercamiento, aplicado en mayor escala, condujo a Dubos al convencimiento de que los agentes químicos que acaban con la enfermedad pueden, a veces, provocar un final mortal.

La visión interactiva de los organismos y el medio le movió a confesarse un "desesperado optimista" en el tema de la depredación humana del ecosistema global. Aunque la acción del hombre podía desfigurar la faz de la tierra, también podía restaurarla e incluso crear ambientes que mejoraran en último término la condición de éste.

CAROL L. MOBERG y ZANVIL A. COHN trabajan en el laboratorio de fisiología e inmunología celular de la Universidad Rockefeller. Moberg empezó a colaborar con René Dubos en temas ambientales en 1965 y se doctoró en literatura comparada por la Universidad de Columbia en 1978. Cohn es codirector del laboratorio y da clases en la Rockefeller. Harvard le concedió el título de doctor en medicina en 1953; cinco años después se incorporó al laboratorio de Dubos en la Rockefeller.

Cuando Dubos contaba ocho años de edad, una grave miopía y un debilitante ataque de fiebre reumática le forzaron a realizar la primera de las muchas adaptaciones, o reajustes, de su vida. Abandonó sus sueños de convertirse en ciclista o tenista de éxito y canalizó sus ahora limitadas condiciones atléticas hacia una inquietud intelectual que dominó el resto de su vida. Su espíritu solitario se nutrió de paseos meditativos por la campiña francesa. Leyó con avidez y encontró héroes infantiles en las traducciones de las novelas del oeste de Buffalo Bill y en los relatos policíacos de Nick Carter. Halló así una forma de salud diferente, a pesar de sus minusvalías físicas.

A los 14 años, Dubos se encontró con una fuerza moldeadora del medio: un ensayo de Hippolyte Taine describía el influjo de la campiña de la Île de France, que rodeaba París, en las fábulas de La Fontaine. El adolescente percibió el modo en que esos relatos dependían del paisaje de la región, en donde la naturaleza adoptaba dimensiones humanas y servía también de medida de la vida del hombre. A los 80 años, Dubos aún recitaba de memoria su fábula favorita de La Fontaine, "El viejo y los tres jóvenes", y reflexionaba sobre su devoción por plantar árboles: "Yo [me] digo, como hizo el viejo La Fontaine, que alguien disfrutará la sombra que proyectarán los árboles cuando yo me haya ido."

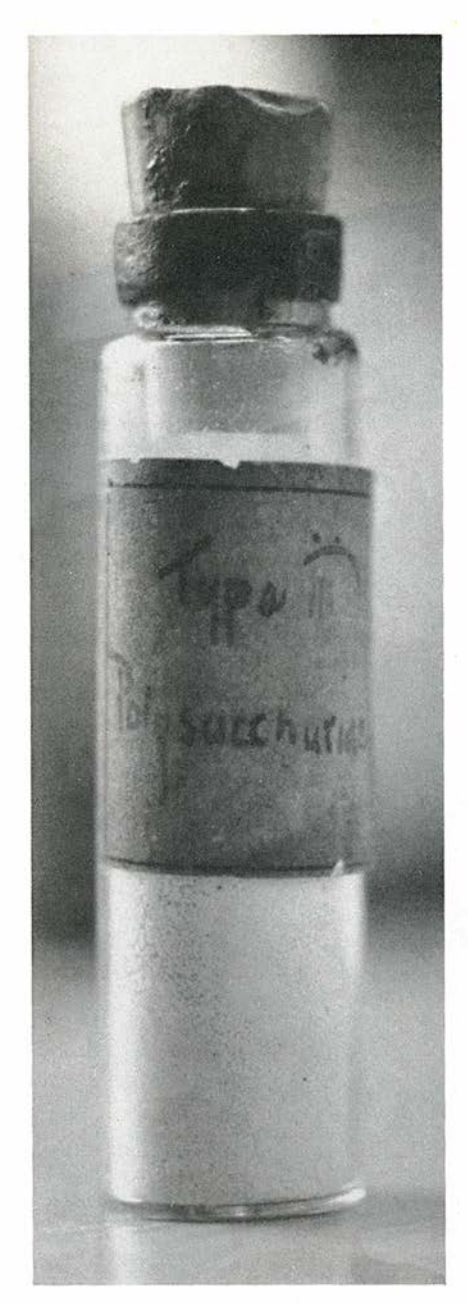
Una serie de hechos casuales, y su respuesta a ellos, conformaron el inicio de su carrera. Cuando se recobró de un segundo brote de fiebre reumática, tan sólo encontró un lugar donde aún pudiera matricularse ese año, el Nuevo Instituto Agrónomo Nacional, de París. Superó con comodidad todos los cursos, excepto la microbiología. Más tarde recordaba que "se aburría intensamente" porque se limitaba a la descripción taxonómica. Tampoco le gustaba la química y dijo a su madre que no volvería a entrar en un laboratorio. Al graduarse, Dubos ganó una beca para estudiar agricultura y tecnología en Indochina, pero la perdió por culpa de su reumatismo cardíaco.

Indeciso acerca de la carrera que debía seguir, encontró un trabajo en Roma, en una sección de la Liga de las Naciones, consistente en escribir resúmenes para un periódico agrícola. Mientras estaba sentado en los jardines del Palatino en un caluroso día de mayo, dejó la lectura de los fertilizantes y pasó a un artículo del ruso Sergei Winogradsky, microbiólogo del suelo. Winogradsky escribía que los microorganismos no debían estudiarse en cultivos artificiales de laboratorio, sino en su ambiente natural, en competencia con otras bacterias. Su vida académica, explicaría Dubos andando el tiempo, empezó con esta idea. Se comprometió con ese enfoque ecológico de la ciencia y decidió, pese a todo, estudiar microbiología.

Dubos quiso hacer una viaje a los Estados Unidos antes de reanudar sus estudios. Las circunstancias determinarían que permaneciera allí más de 50 años. En el vapor *Rochambeau* coincidió con Selman Waksman, bacteriólogo del suelo a quien había enseñado Roma durante un congreso internacional. Cuando Waksman conoció su intención de estudiar bacteriología, aunque no tenía todavía planes definidos, le ofreció una beca para estudiar en la Universidad de Rutgers. Dubos llegó a Nueva York y acompañó a Waksman esa misma tarde al campus de Rutgers, en New Jersey.



1. RENE JULES DUBOS (1901-1982) nació en Francia y emigró a los Estados Unidos a los 23 años. Casi toda su carrera profesional transcurrió en el Instituto Rockefeller de Investigaciones Médicas, la actual Universidad Rockefeller; allí obtuvo el primer antibiótico de interés clínico. Pasaba su tiempo libre plantando y podando los árboles que rodeaban su casa de Hudson Highlands, en Garrison, Nueva York.



2. LOS POLISACARIDOS BACTERIANOS fueron el reto que Oswald Avery le lanzó a Dubos. La cubierta de azúcares complejos protegía, contra las defensas del organismo, a una cepa de pneumococos virulenta. Dubos aisló una enzima que disolvía esa cubierta protectora.

Tres años más tarde, se doctoraba en microbiología del suelo. En la línea de Winogradsky, su tesis doctoral demostró que las características ambientales del suelo, específicamente el *p*H, la humedad y la aireación, determinan qué microbios se han de activar para descomponer la celulosa.

En su calidad de edafólogo, se sintió atraído hacia lo que él llamaba la "necesidad fisiológica" de tres conceptos que iban a modelar su vida científica. El primero: existe un sinfín de microbios que realizan tareas de reciclado de materia orgánica, limitadas y bien definidas; gracias a ello, no se acumula en la naturaleza. La segunda idea expresaba lo siguiente: los microbios no digieren los alimentos de manera indiscriminada; antes bien, son consumidores selectivos, susceptibles de ser aislados y adiestrados en determinadas misiones. Examinó, por último, la función microbiana en mezclas complejas: no sólo se ejercían mutuo influjo en su comportamiento y desarrollo, sino que el entorno condicionaba también sus actividades. Más tarde amplió esta idea de la interacción ecológica en teorías que ligaban los microbios con el hombre y a éste con la tierra.

Otro acontecimiento fortuito le llevó al Instituto Rockefeller de Investigaciones Médicas en 1927. El Consejo Nacional de Investigación rechazó una petición de beca formulada por Dubos porque no tenía la ciudadanía norteamericana, pero le sugería que consultara al becario francés Alexis Carrel, que trabajaba en el Rockefeller. Carrel, cardiólogo, le invitó a almorzar en el comedor del Instituto y lo sentó cerca de Oswald Avery, médico cuyas investigaciones sobre el neumococo le llevaron al descubrimiento, en 1944, de que el ADN constituía el material hereditario.

Pero en la fecha en que Dubos coincidió con Avery, el laboratorio de éste en el hospital se dedicaba a la búsqueda de un suero que curara la neumonía lobar, una enfermedad mortal. Avery había fracasado en su intento de descomponer la cápsula polisacárida que protegía al neumococo virulento tipo III. Sabía que el primero que lograra destruir la cápsula, sin provocar efectos secundarios, descubriría la forma de curar la neumonía.

Dubos estaba bien preparado para este encuentro casual. Pasaron la tarde hablando de los trabajos del primero sobre microbios recicladores que digerían celulosa, polisacárido también, y de las preocupaciones de Avery sobre la cápsula del pneumococo. Con un punto de arrogancia, al tratarse de un recién doctorado, afirmó el francés: "Yo puedo encontrar un germen que descomponga [esta] cápsula y extraer del germen una enzima." Excitado ante la posibilidad, Avery le consiguió una beca. Dubos siempre agradeció, a él y al Rockefeller, "haber contratado una persona como yo, que desconocía todo acerca de la medicina y que procedía de una estación experimental agrícola, y haberle brindado la fortuna de trabajar en un hospital".

Sumergido de lleno en un medio hospitalario con pacientes neumónicos, suministró cubiertas de polisacáridos del pneumococo tipo III a una muestra del suelo procedente de un campo pantanoso de arándanos de New Jersey. La mayoría de los microbios, no acostumbrados a dietas de polisacáridos, cayeron en un estado de latencia, pero una bacteria modificó su conducta y digirió la comida suministrada. A partir de esta bacteria, Dubos aisló una enzima responsable de la digestión de las cápsulas de polisacáridos y la llamó SIII. El triunfo llegó antes de transcurrir tres años de la fanfarronada de Dubos: la enzima curaba a los animales infectados y permitía que los pneumococos desnudos cayeran presa de los mecanismos fagocíticos del organismo. Sin embargo, el advenimiento de las sulfamidas frustró el desarrollo posterior de esta enzima.

La bacteria de los limos de arándanos presentaba la peculiaridad de sintetizar la enzima SIII cuando su única fuente de alimentos era el polisacárido capsular. Además, la producción enzimática no comportaba cambio alguno en la constitución genética del microbio. La enzima se producía en virtud de una respuesta adaptativa a una imperiosa fuerza nutritiva de su entorno. Este hecho tan simple encerraba un principio fundamental: cualquier organismo viviente posee potencialidades múltiples; su expresión depende de influencias externas.

Dicha adaptabilidad, en opinión de Dubos, residía también en el hombre. "Se puede afirmar", dijo, "que cada uno de nosotros nace con potencia para llegar a ser varias personas diferentes, pero lo que somos actualmente depende de las condiciones bajo las cuales nos desenvolvemos. Estas condiciones, además, derivan en gran medida de nuestra propia elección".

Tuvo más éxito con las técnicas de cultivo de suelos. Aisló otras enzimas bacterianas: por ejemplo, una que degradaba la creatinina y otra que convertía la creatina en creatinina. Esta última aún se usa en algunas pruebas que miden la creatinina en sangre y orina y para determinar la función renal. Halló incluso una enzima que licuaba el chocolate, disolviéndose fácilmente en la leche. Vendido como Bosco, aún constituye un deleite para los niños.

En 1938, obtuvo y purificó parcialmente una enzima que degradaba de forma selectiva el ácido nucleico en levaduras y pneumococos. La llamó ribonucleasa. Más tarde demostró ser una valiosa herramienta de trabajo para otros investigadores del Rocke-

feller. Stanford Moore y William H. Stein usaron ribonucleasa altamente purificada en su trabajo sobre análisis de aminoácidos; Bruce Merrifield seleccionó esta pequeña enzima como primera prueba para el método en fase sólida de la síntesis proteica. Por estos hallazgos, los tres ganaron el Nobel de química.

Los descubrimientos enzimáticos de Dubos sentaron las bases del desarrollo de los antibióticos. Se propuso encontrar una enzima que destruyera una bacteria entera, y no sólo una estructura celular específica. Los organismos gram-positivos (pneumococos, estafilococos o estreptococos) le sirvieron de exclusiva fuente alimentaria de sus muestras de suelo. En 1939 culminó su investigación con el aislamiento de *Bacillus brevis*, del que extrajo un agente antibacteriano al que llamó tirotricina. La tirotricina no era una enzima simple, sino que contenía dos polipéptidos, tirocidina y gramicidina.

La tirocidina es tóxica para todas las células vivas; la gramicidina, activa tanto en el tubo de ensayo como en los animales frente a las bacterias gram-positivas, es, sin embargo, de uso exclusivamente externo, ya que destruye los hematíes. Con un gran poder de curación, la gramicidina fue el primer antibiótico producido comercialmente y empleado en la clínica. Aún se usa.

Antes de la gramicidina, los agentes quimioterápicos se basaban en tóxicos químicos (arsénico, mercurio o colorantes), a propósito de los cuales Paul Ehrlich predijo que, a la vuelta del siglo, actuarían como "balas mágicas". No ocurrió así. La especificidad de la gramicidina hizo que Rolin D. Hotchkiss, colaborador de Dubos, la llamara "fármaco amable y delicado". Coherente con su inclinación ecológica, había usado muestras de suelo para buscar y aprovechar naturalmente los antagonismos bacterianos. Su investigación sistemática proporcionó una aproximación racional a la quimioterapia.

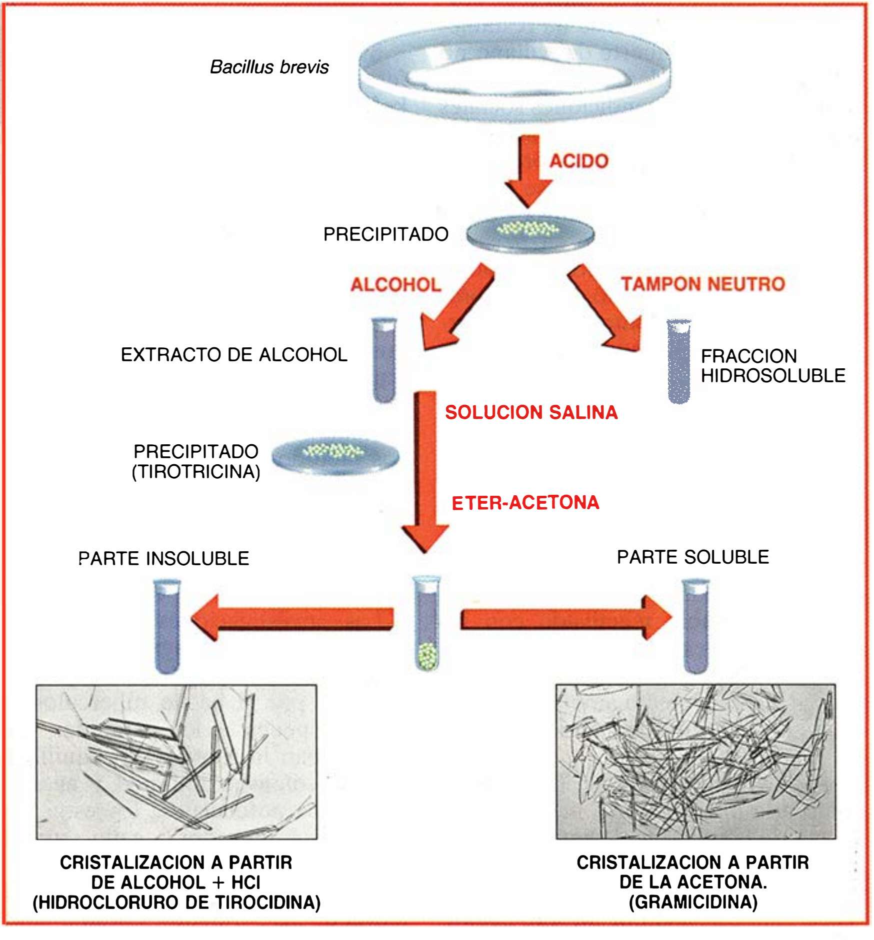
La contribución más notable de este trabajo, como muchos de los descubrimientos de Dubos, no fue el aislamiento de una sustancia específica, sino la síntesis de ideas directrices que condujeron hacia áreas nuevas de la ciencia médica. Movido por una inclinación filosófica, lo suyo era buscar sin cesar principios generales en el trabajo de la naturaleza. Siguió siempre el consejo de Avery, quien le indujo a mostrarse "atrevido en la formulación de hipótesis" y "humilde en presencia de los hechos".

Se le veía a sus anchas entre las bases conceptuales de los problemas y las hipótesis creativas, pero era muy desconfiado con sus propios hallazgos. Cuando decidió no proseguir en el campo de los antibióticos, quiso abandonar sus proyectos de investigación. Los desechaba porque los conocimientos y las técnicas en uso no permitían ir más allá. Otros proyectos dejaban de satisfacerle, una vez había abierto un camino. Algunos eran más convenientes para los laboratorios comerciales. Durante su vida, Dubos diseminó nuevas ideas, convencido de que otros desarrollarían su trabajo inicial. Se sentía justificado en la proposición de cuestiones críticas, porque así "contribuía en algo más eficaz que en hacer otro experimento".

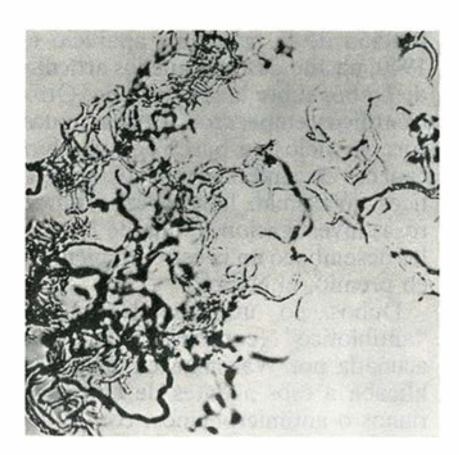
Con el descubrimiento de la gramicidina, la medicina adquirió una batería de armas nuevas. El trabajo de Dubos animó a los científicos ingleses Howard Florey y Ernst Chain a revitalizar la investigación sobre la penicilina, que Alexander Fleming había encontrado accidentalmente en 1928. El primer informe sobre la utilización de la penicilina apareció en 1940, un año después que los artículos de Dubos sobre la gramicidina. Otros científicos empezaron a tratar muestras de suelos en busca de microbios capaces de sintetizar nuevos antibióticos. Waksman llevó a cabo numerosas investigaciones, una de las cuales desembocó en la estreptomicina y, en premio, el Nobel.

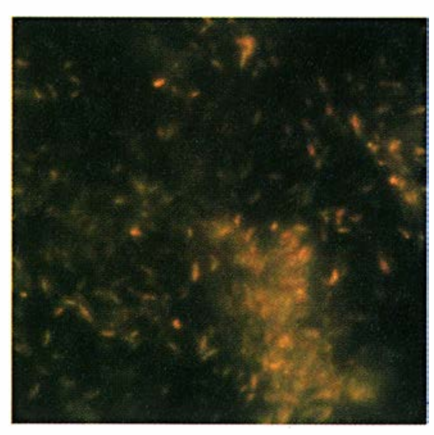
Dubos no utilizaba la palabra "antibiótico" (contrario a la vida), acuñada por Waksman en 1942. Calificaba a esos agentes de antibacterianos o antimicrobianos, con lo que acentuaba su acción selectiva encaminada a renovar la vida y la salud.

Antes incluso de que se dispusiera de otros antibióticos, predijo que las bacterias se adaptarían a estos fármacos y producirían cepas resistentes. Aunque reconoció grandes victorias en la batalla contra las infecciones fatales, criticó la quimioterapia. Defendía que la eficacia de un fármaco venía determinada no sólo por su acción sobre el parásito, sino también por las condiciones imperantes en el cuerpo del huésped.



3. AISLAMIENTO DE LA GRAMICIDINA, el primer antibiótico; se consiguió con el enfoque ecológico de Dubos. Alimentó organismos del suelo con pneumococos, estafilococos y estreptococos hasta encontrar un microbio, el *Bacillus brevis*, que prosperaba en la dieta patógena.





4. BACILO DE LA TUBERCULOSIS, hecho crecer en medios de cultivo ordinarios: forma grumos que resisten al estudio (*izquierda*). Dubos y su compañero Bernard D. Davis desarrollaron un medio que contenía detergentes no tóxicos que disolvían la cápsula cérea del bacilo, lo que permitía un crecimiento rápido y disgregado (*derecha*). Este avance posibilitó los primeros estudios cuantitativos fiables sobre el bacilo de la tuberculosis y sus propiedades patógenas.

Dubos comparó la "mentalidad conquistadora" de los fármacos con la filosofía del "vaquero" de sus novelas del Oeste: "En la ciudad fronteriza de la que se ha enseñoreado el crimen, el héroe, sin ayuda, termina con los malhechores que atravesaban, en estampida, el poblado", escribió. "La historia termina con un final feliz porque parece que la paz se ha restablecido. Pero... la muerte del villano no resuelve el problema fundamental, porque las malas condiciones sociales que habían abierto la ciudad a los malhechores franquearían pronto el paso a otros, a no ser que se hiciera algo para erradicar la causa de los problemas". Trasladando su perspectiva ecológica de los microbios al hombre, Dubos se convenció de que el problema no era el control de la enfermedad, sino la promoción de la salud.

Un trágico suceso centró su atención en la faceta humana de la enfermedad. Su primera esposa murió de tuberculosis en 1942, nada más haber él aceptado una plaza de profesor en la Facultad de Medicina de Harvard. Como de niña había sufrido la enfermedad en Francia, pensó él que se le había reactivado con las preocupaciones familiares a causa de la guerra. Su enfermedad alertó a Dubos acerca del efecto ambiental sobre el equilibrio entre la salud humana y las bacterias.

A través de Avery, se había acercado a la microbiología médica de la mano de la doctrina decimonónica de la especificidad etiológica, que consideraba que cada enfermedad infecciosa está causada por un solo agente microbiano. Esta "teoría de los gérmenes de enfermedad" constituyó una fuerza poderosa en el desarrollo de la medicina; implicaba que las enfermedades podían prevenirse o tratarse atacando sus microbios. Más tarde pondría en duda este enfoque ortodoxo al observar que "la enfermedad microbiana constituía la excepción, no la regla. ¿Por qué los [agentes] patógenos fallan tantas veces en causar la enfermedad después de haberse establecido en los tejidos?".

Su investigación tomó un rumbo diferente cuando volvió en 1944 al Rockefeller y puso en marcha un laboratorio dedicado a la tuberculosis. Comenzó con un avance técnico: la introducción de agentes detergentes no tóxicos en el medio de cultivo para evitar que los bacilos formaran masas al crecer. Esta innovación le permitió seguir un planteamiento similar al que Avery utilizó con el pneumococo: buscó las diferencias morfológicas e inmunológicas entre las cepas de bacilo inocuas y cepas que causaban la enfermedad. (Abordó también nuevos métodos para generalizar el uso estándar de la vacuna con el bacilo de Calmette-Guérin [BCG] contra la tuberculosis, guiado siempre por la máxima de que más vale prevenir que curar.)

Las investigaciones morfológicas no aportaron nada seguro. Dubos resolvió someter a prueba las respuestas emitidas por el bacilo tuberculoso y sus huéspedes a los estímulos que provocaban la ruptura del equilibrio en que conviven huésped y agentes patógenos potenciales. En estos experimentos, llevados a cabo durante 20 años, incorporó conceptos de enfermedad que habían precedido a la teoría de los gérmenes. Estudió tanto el posible fallo del sistema inmunitario del huésped como el impacto de factores externos sobre los procesos internos. En cierta fase del ensayo, identificó sustancias hísticas que aparecían naturalmente y que condicionaban el crecimiento y la viabilidad del bacilo tuberculoso. Observó que el complejo microambiente que subyacía en una inflamación determinaba el curso del proceso infeccioso. También encontró que estas influencias microambientales, la dieta, las toxinas, el clima, el hacinamiento y los plaguicidas afectaban a la sensibilidad ante la infección y la enfermedad.

La fase final de este trabajo, con animales de experimentación, demostró que la acción precoz de influencias ambientales ejercía un efecto permanente sobre el crecimiento, desarrollo, requerimientos nutritivos y resistencia frente a diversos estímulos. Llamó a este fenómeno "freudismo biológico". La investigación de Dubos estableció que la enfermedad no era fruto de la presencia de organismos patógenos, sino ecosistema que implicaba hechos diversos. "Su solución", predijo, "va más allá del tratamiento de los síntomas de un paciente y puede necesitar reformas sociales que lleguen incluso al terreno de la ética".

Desde una labor y una mentalidad ecológica, reformuló la teoría de la causa de la enfermedad, en la que involucraba el entorno entero. El microbio es, descubrió, causa necesaria pero no suficiente de la enfermedad. Halló que la infección provocada por bacilos tuberculosos u otros patógenos no era, por sí sola, desencadenante de destrucción y podía permanecer en estado latente durante largos períodos. En condiciones favorables, hasta los ubicuos microbios no patógenos pueden causar enfermedades.

Mantuvo que el elemento esencial de la enfermedad no residía en la infección, sino en cualquier estímulo, interno o externo, que alterara la resistencia y provocara el ataque y el éxito subsiguiente de la condición morbosa. Al considerar la enfermedad parte del ecosistema general, puso en juego una nueva idea: si queremos aumentar nuestro bienestar físico y espiritual, debemos entender y controlar el impacto que provocamos en nuestro entorno.

A diferencia de Avery y Pasteur, dos de sus héroes personales, Dubos no expuso su trabajo mediante un "experimento protocolo" que asentara un principio. Prefirió organizar una campaña para atraer a otros científicos interesados en una idea y promulgar su importancia. Su capacidad como promotor de ideas le llevó a protagonizar desde conversaciones informales a sesudas conferencias. Aquellos a quienes contagiara con sus

hipótesis pensarían en ellas y volverían con objeciones, ideas nuevas o resultados experimentales.

Tras un día dedicado a la investigación experimental, los compañeros de trabajo se reunían en el despacho de Dubos. Allí, con los pies en su mesa y las manos entrelazadas detrás de la cabeza o estirando un mechón de sus cabellos, Dubos especulaba acerca de lo que le sugerían los resultados del día. Tal y como recuerda el virólogo Frank Fenner, "cualquier indicación interesante formaba la base de una pirámide invertida de dura especulación, que no pocas veces colapsaba el trabajo del día siguiente. Pero todos estábamos entusiasmados con nuestro trabajo, sobre todo él, y avivaban nuestro interés aquellos saltos de trapecio que René daba".

Dubos era también aficionado a relatar historias y sus hipótesis favoritas en el legendario comedor del Rockefeller. Con temas como el crecimiento de trufas en el laboratorio, las infecciones que producían tulipanes jaspeados o por qué el agua no se congelaba en invierno en las bocas de incendios, animaba cada comida con su curiosidad e imaginación. En el *Hospital Club Journal*, de aparición bimensual, sus críticas hacían mella entre los científicos jóvenes; era edificar para ver cómo la construcción propia se derrumbaba formando una pila de ladrillos que, unidos nuevamente por Dubos, constituían una pieza arquitectónica maestra.

Las opiniones de Dubos avivaron el ingenio de sus colaboradores e influyeron en su trayectoria profesional. Cuando sus compañeros del Rockefeller le proporcionaron un foro ideal para que expusiera sus ideas, sus penetrantes intuiciones y sus memorables presentaciones sirvieron para concentrar la atención de todos ellos en problemas básicos. Moore, Stein y Merrifield son sólo tres de las docenas cuya fama posterior se debe a una de esas chispas de Dubos. (El Nobel francés André Lwoff escribió en cierta ocasión que ojalá que ese galardón se concediera "más por las ideas que por las moléculas".)

Mirage of Health ("Espejismo de salud"), publicado en 1959, constituye su libro que mejor recoge la teoría ecológica de la enfermedad. Sostiene que el hombre nunca se verá libre de ella, porque debe adaptarse continuamente a un entorno cambiante. Predijo que las sociedades de masas uniformes sufrirían nuevas enfermedades. Afirmó que la salud "no es necesariamente un estado de fortaleza y ... bienestar, ni siquiera... una vida prolongada. Estar sano no significa no padecer ninguna enfermedad, sino poder funcionar, hacer lo que se quiere y conseguir lo que se desea". Un aspecto muy interesante de esta definición, hecha hace 30 años, es que sitúa la tarea de mantener la salud en el paciente y no en el médico ni en la medicina científica.

Estudió también, a extramuros de su laboratorio, el aspecto histórico y social de la enfermedad. La experiencia personal le convenció de su raíz en los procesos dinámicos de la vida. Después de que su segunda esposa, Jean, convaleciera de una tuberculosis, colaboró en una investigación sobre los factores ambientales de esta enfermedad, del que resultó *The White Plague*, aparecida en 1952. Al poco tiempo, en cruel confirmación de su hipótesis, caía él víctima de la presión de sus obligaciones: una úlcera gástrica masiva le llevó al borde de la muerte. Una vez más tuvo que buscar un nuevo tipo de salud: adoptó una forma de vivir muy sencilla y un trabajo austero para dedicarse a investigar, escribir y dar clases.

Nunca interrumpía su trabajo, salvo para plantar y podar los árboles que crecían exuberantes en su casa de Hudson Highlands. Disfrutaba desbrozando la maleza y apartando las piedras para hacer sitio a los árboles y conseguir mejores vistas. Tal ejercicio físico le daba fuerzas para dedicar mucho tiempo a escribir, lo que con frecuencia hacía en el jardín, donde los árboles, los insectos, los pájaros y las flores constituían su mobiliario de oficina.

El paso de Dubos a la ecología humana se produjo en los años cincuenta. Sus conocidas opiniones sobre las relaciones entre la salud del hombre y las fuerzas ambientales le convirtieron en portavoz de los preocupados por la salud de la tierra. De él salieron las primeras denuncias sobre los desastres ecológicos, pero criticaba también a los pesimistas. Dirigió su conocimiento de los principios ecológicos hacia la formulación de los complejos problemas que rodean la cuestión ambiental. Se apartó de la ortodoxia científica y médica y proporcionó a la ecología nuevas y audaces hipótesis. Introdujo en un contexto humano cada una de sus conclusiones y pidió cambios fundamentales en la manera de pensar y vivir de la gente.

Dubos vio en la humanidad un factor de equilibrio para la salud del planeta. "No hay ecología natural", dijo. "El hombre lo ha cambiado todo en la naturaleza." Desde esa consideración de partida, abordó las crisis ambientales en el marco de un problema mayor: el de la alteración de las relaciones que vinculaban al hombre con la naturaleza. Aunque sus opiniones sobre la explotación abusiva del planeta estaban coherentemente desarrolladas, creía que las crisis ecológicas amenazaban destruir la calidad de vida más que a la propia humanidad. Concentró su empeño en preservar la humanidad, mientras que las posibilidades que la vida encerraba estimulaban su curiosidad y espíritu de aventura.

Le preocupaba la adaptación dócil y acrítica de la gente a su entorno, que no le molestaran los gases del tubo de escape de los automóviles, ni la fealdad de las ciudades, ni "los cielos sin estrellas, las avenidas sin árboles, los edificios funcionales, el pan insípido, las celebraciones tristes". Anunció que la falta de estímulos sensoriales dignos de recibirse se vería compensada por otros procedentes de ruidos estridentes, luces brillantes y drogas. Tal y como había observado en los microbios del suelo, describió adaptaciones entre la humanidad y la tierra por las que se modelaban mutuamente. "No vivimos en el planeta Tierra sino con la vida que alberga y en el medio que la vida crea." Reconociendo los peligros del dejarse llevar, el hastío y el desencanto de los jóvenes, apelaba con energía a la capacidad humana y a la necesidad de responder creativamente al entorno de cada cual.

En la cumbre de su fama en los años setenta, sorprendía deliberadamente a su audiencia que le seguía con preguntas tan poco ortodoxas como las siguientes: "¿Comprenden que el césped no es natural y que su mantenimiento es un crimen ecológico?" "¿Necesitan en realidad la medicina cada vez que están enfermos?" "¿Por qué admiran ese desastre ecológico que es el Gran Cañón y quieren visitar semejante ejemplo de erosión del terreno?"

Minó concepciones ecológicas en boga: "La naturaleza no conoce lo mejor", y se ponía a explicar cuán ineficaz, destructora y derrochadora llegaba a ser. "No hay recursos, sólo ingenio humano." Ponía de ejemplo el aluminio, que se convirtió en materia prima cuando pudo aislársele. Negaba que la "naturaleza humana" fuera anticonservacionista, y recordaba que allí donde la gente se instala, trasforma la naturaleza y la adapta a sus necesidades biológicas, que no han cambiado durante miles de años.

Con su doctrina sabia y esperanzada, Dubos se mantuvo fuera del movimiento ecologista de los años se-

tenta, que consideraba verdugo a la humanidad y, víctima, a la naturaleza. Ciñó su atención a las interacciones entre el hombre y su medio, y a las modificaciones que se operaban. Denunció la degradación de la calidad de vida, pero tenía una fe grande en la capacidad humana para la renovación, la creación y la autotransformación. Como un viejo militante del movimiento ambientalista, redefinió la ecología como una ciencia humanista.

Proponía abordar siempre los problemas en su origen: no discutir sobre los residuos tóxicos y los vertederos, sino sobre la necesidad de contenedores y el agotamiento de los recursos; no insistir sobre la degradación de los humedales, sino en la necesidad de más aeropuertos o aparcamientos. Apeló a la iniciativa privada para comenzar a actuar. Creía firmemente que las soluciones no provenían de "las proclamaciones oficiales hechas en grandes universidades, de los programas políticos de los gobiernos ni de las recomendaciones de los grupos de expertos, sino de todas las personas responsables y comprometidas, las únicas que pueden salvar el planeta".

Dubos, conferenciante carismático, sorprendía en sus intervenciones, con su acento agradable y su trato familiar. Alto, corpulento, de mejillas sonrosadas, calvo con algunos mechones blancos y perdurables, irradiaba una inagotable alegría de vivir. Uno se veía atrapado inmediatamente por sus solícitos ojos azules filtrados por unos gruesos cristales, una tímida y amplia sonrisa y unas manos grandes y hermosas que subrayaban cada frase. Podía describir intencionadamente extravagantes hipótesis o hablar mediante sencillas parábolas. Inventó numerosos lemas para simplificar sus vastos mensajes, entre ellos: "Piensa globalmente, actúa localmente", que sigue inspirando a los ecologistas. Desgranaba anécdotas personales para ejemplificar su gran experiencia sobre la naturaleza humana. Con un asombroso caudal de conocimientos y una mezcla de ingenio

El conformador conformado

La capacidad de René Dubos para pensar en varios niveles a la vez es evidente, a propósito, sobre todo, de la importancia del medio en el desarrollo de un organismo. Se tenía conciencia plena de ese principio, toda vez que la misma bacteria expresaba propiedades diferentes a tenor de las características del medio: los factores externos determinaban si la infección bacteriana de un animal huésped conducía a una coexistencia pacífica o a la enfermedad y los cambios en el entorno de la gente podían alterar su conducta.

Dubos ejemplificaba este principio con los argumentos esgrimidos por Winston Churchill en el debate sobre la reconstrucción de la Cámara de los Comunes, que sufrió el bombardeo alemán. Muchos defendían el levantamiento de un edificio distinto para dar cabida a las nuevas exigencias, pero Churchill insistió en que se reconstruyera tal y como era antes, porque hacerlo de otro modo sería cambiar el estilo del debate parlamentario inglés y, en último extremo, los fundamentos democráticos de la misma sociedad inglesa. "Nosotros damos forma a nuestros edificios", dijo, "y después ellos nos dan forma a nosotros".

Otro ejemplo, algo más próximo al domicilio de Dubos, era Jamaica Bay. A principios de los sesenta, el desarrollo urbanístico había transformado la bahía: lo que era criadero de ostras y zona de freza de los peces, con marismas protectoras donde medraban las aves acuáticas, se había convertido en una masa de agua exánime, cuyas riberas se hallaban edificadas. Más de 1500 tuberías de desagüe desembocaban allí.

Los residentes de la zona comenzaron a luchar por la recuperación de la bahía y replantación de las especies vegetales. En 1970, Dubos y otros sensibilizaron a la opinión pública para impedir la ampliación del aeropuerto internacional Kennedy en el lado de la ensenada. Dubos puso en la picota la idea de que era necesario un estudio de dos años para determinar si dicha ampliación podía dañar el ecosistema de Jamaica Bay. El sentido común, dijo Dubos, no deja lugar a dudas sobre el impacto adverso del dragado de la bahía y su rellenado con varios millones de metros cúbicos de tierra.

Se consiguieron ulteriores mejoras con estaciones depuradoras y la conversión en parque de la mitad del perímetro de la bahía. Veinte años después, han vuelto al lugar más de 250 especies de aves, amén de moluscos y peces. La bahía es ahora un refugio de vida salvaje en la zona de Recreo Nacional de Gaterway; una península al otro lado del aeropuerto Kennedy ha recibido el nombre de Parque Dubos Point Wetland. Dubos citaba a menudo el caso de la ensenada para demostrar que basta un puñado de hombres para ejercer un efecto beneficioso para el entorno, y éste devuelve el beneficio a muchas más personas.



Parque Dubos Point Wetland

y elocuencia, llevaba a sus oyentes hasta la risa, el enfado, las lágrimas y los aplausos entusiastas.

Su doctrina ecológica se recoge en varios libros, preparados con los borradores de sus conferencias. Describió las influencias del medio natural y el construido por el hombre sobre el bienestar físico y mental. Insistió en la capacidad humana para mantener relaciones diferentes con los lugares, las personas y las culturas, creando múltiples hábitats y modos de vivir.

Las últimas palabras de Dubos fueron para difundir sus teorías sobre la mejora de la naturaleza por el hombre y la conjura de la degradación del medio. Alentó hacia un uso responsable de la ciencia y la técnica. Desarrolló su pensamiento según el cual "dondequiera que hay seres humanos implicados, tendencia no es sino". Como biólogo profundizó en el conocimiento de nosotros mismos; como humanista, defendió nuestra capacidad para crear ambientes bellos y saludables.

Al final de su vida, le fue dado ver cómo el movimiento en pro de la tierra, cuyos fundamentos teóricos había ayudado a construir, se transformaba de un pequeño elemento marginal en una gran fuerza política y cultural. Presenció el primer Día de la Tierra en abril de 1970, algo más que una celebración contracultural. Pronosticó que la gente pondría "el derecho a un ambiente sano y agradable entre los llamados *naturales*" y exigiría su "derecho a una calidad ambiental". En el Día de la Tierra de 1980 acotó nuestro problema ambiental más difícil y apremiante: definir los derechos y deberes individuales en el tratamiento de la salud del planeta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE TORCH OF LIFE. René Dubos. Simon and Schuster, 1962.

SO HUMAN AN ANIMAL. René Dubos. Charles Scribner's Sons, 1968.

LOUIS PASTEUR: FREE LANCE OF SCIENCE. René Dubos. Charles Scribner's Sons, 1976.

THE WOOING OF EARTH. René Dubos. Charles Scribner's Sons, 1980.

MIRAGE OF HEALTH: UTOPIA, PROGRESS AND BIOLOGICAL CHANGE. René Dubos. Rutgers University Press, 1987.

LAUNCHING THE ANTIBIOTIC ERA: PERSONAL ACCOUNTS OF THE DISCOVERY AND USE OF THE FIRST ANTIBIOTICS. Dirigido por Carol L. Moberg y Zanvil A. Cohn. Rockefeller University Press, 1990.

THE WORLD OF RENÉ DUBOS: A COLLECTION FROM HIS WRITINGS. Osborn Segerberg, Jr. Dirigido por Gerard Piel. Henry Holt & Company, 1990.

Ciencia y sociedad

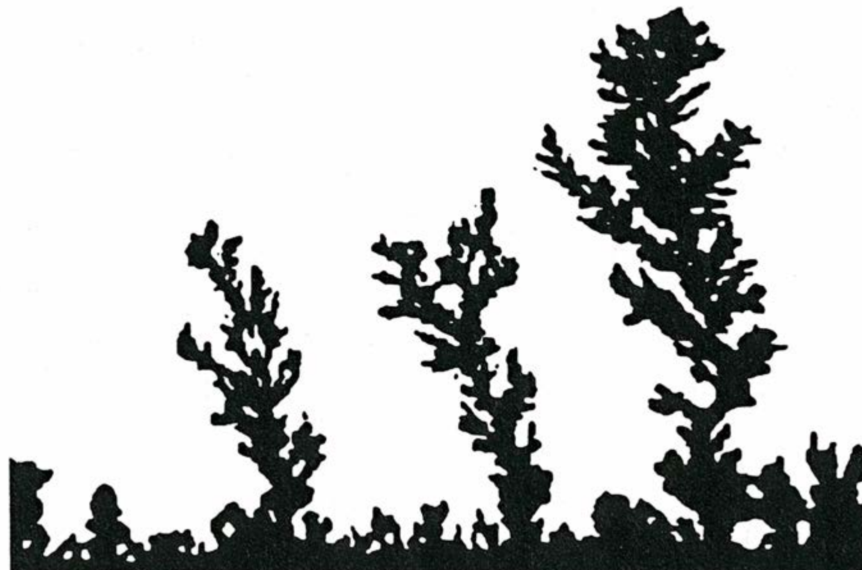
Electroquímica fractal

Muchos de nosotros hemos experimentado en alguna ocasión cierta sensación de levedad al ver caer copos de nieve. Aunque el campo de las emociones se escapa a la metodología de las ciencias de la naturaleza, quizá no resulte descabellado del todo relacionar ese sentimiento de ligereza con la propia estructura de los copos de nieve. Compuestos de pequeños cristales de hielo que se disponen en configuraciones ramificadas y regulares, los copos parecen aptos para ocupar el mayor volumen posible con la mínima masa.

Este tipo de presentación singularmente ligera de la materia condensada no constituye ninguna rareza, antes bien se trata de un fenómeno consustancial a muchas formas de materia agregada de tamaños muy diversos y característicos. Pensemos en los coloides o los aerosoles. Pero aquí nos interesa una clase de agregación diferente, de la que nuestro grupo viene ocupándose durante los últimos años en el Departamento de Química Física de la Universidad de Barcelona. Nos referimos a la *electrodeposición*, fenómeno que, con el concurso de una corriente eléctrica, tiene lugar en la interfase entre un sólido conductor y una disolución electrolítica.

Según es conocido, la *electrólisis*, consiste en la transformación química que se produce en una disolución conductora o en una sal fundida que contiene dos conductores metálicos, dos electrodos, unidos a un generador de corriente. En el caso de una disolución de una sal metálica, los cationes correspondientes se *reducen* a su estado metal y crean un depósito en el *cátodo*. De acuerdo con las *leyes de Faraday,* así llamadas en honor del químico inglés que las estableció en 1833, la masa de metal depositada es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la disolución. La electrólisis ofrece, pues, un método sencillo y controlable de obtención, con un elevado grado de pureza, de muchos metales y compuestos inorgánicos y orgánicos. Permite, además, producir recubrimientos metálicos superficiales (cincados, cromados y otros), para usos ornamentales o anticorrosivos.

En esa última aplicación resulta imperativo conseguir la regularidad de dichos depósitos, que serán más o menos compactos según las condiciones bajo las que se realice el proceso. Así pues, podemos obtener *agregaciones metálicas* con distintos grados de regularidad, lo que nos remite a la imagen inicial del copo de nieve. La electrodeposición constituye, en efecto, un ejemplo de fragilidad aparente.



1. DEPOSITO DE CINC obtenido en una cuba electrolítica "bidimensional", donde pueden observarse las singulares ramificaciones propias de una estructura fractal. Experimento realizado en el Departamento de los autores en la Universidad de Barcelona.

Un experimento que nos revela estas formas inesperadas de agregación consiste en provocar un depósito electroquímico bidimensional. Para ello se colocan, entre dos placas de vidrio, dos electrodos muy finos de un centenar de micrometros de espesor y separados por unos pocos centímetros. El espacio que media entre las dos placas y el par de electrodos se llena con la disolución acuosa diluida de la sal metálica (por ejemplo, de sulfato de cinc). A continuación se aplica entre ambos electrodos, ánodo y cátodo, una diferencia de potencial de varios volts. Sobre el cátodo comienza entonces a crecer una estructura metálica de cinc, que ofrece un nítido contraste al cabo de unos pocos minutos al observarse a través de una lupa estereoscópica.

Nuestro montaje experimental tiene acoplada a la lupa una cámara fotográfica o de vídeo para registrar las imágenes que, una vez digitalizadas, se almacenan en la memoria del ordenador para su posterior análisis. Ante nuestros ojos se van configurando una diversidad notable de estructuras metálicas, dependiendo aparentemente de la concentración de la disolución y del potencial aplicado. Las hay *dendríticas* como nuestro copo de nieve, es decir, direccionales y anisotrópicas, y las hay altamente irregulares que se asemejan a pequeños árboles metálicos, a las que consideramos como *fractales*.

Debemos a dos físicos ingleses, R. M. Brady y R. G. Ball, del Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, el haber acudido en 1984 a la noción de fractal para caracterizar electrodepósitos arborescentes similares a los que se obtienen con el sencillo experimento descrito anteriormente, aunque en aquel caso los agregados eran tridimensionales. Los fractales que aquí importan son los *sibisemejantes* (también llamados autosemejantes), es decir, aquellos que presentan la propiedad de que cualquier parte de su estructura original manifiesta niveles repetitivos de detalle al ampliarse isotrópicamente (en todas las direcciones) la resolución con que se observa, y así, una vez expandida, parece idéntica a la estructura global. Dicha *invariancia por dilatación de escala*, tal es la denominación técnica de esa simetría, permite definir *dimensiones* no enteras, fraccionarias (de ahí el nombre de fractal, introducido por B. Mandelbrot). La dimensión fractal caracteriza el grado de ramificación del agregado metálico, es decir, la extensión con la que llena el espacio donde se desarrolla.

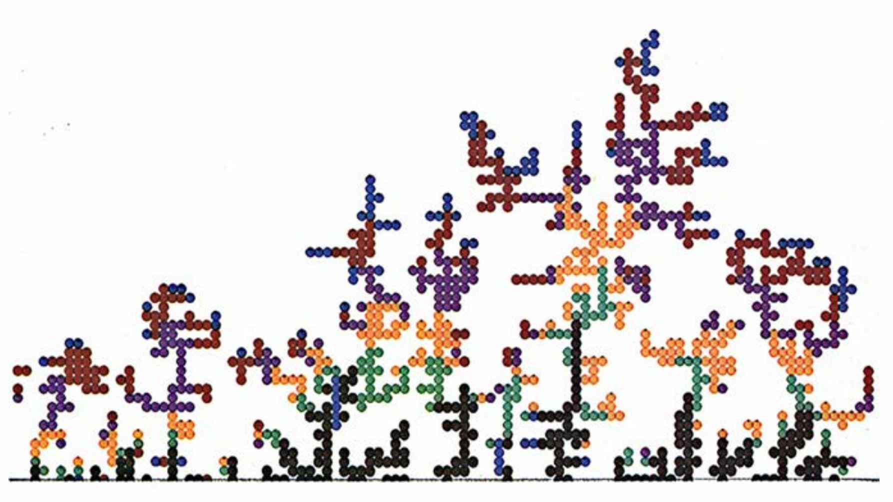
Explicado de manera más porme-

norizada: en nuestros experimentos de electrodeposición, las estructuras arborescentes que crecen en un espacio idealmente bidimensional, con una dimensión euclídea de valor 2, presentan, sin embargo, dimensiones fractales típicas próximas a 1,7. ¿Qué nos dice ello? Que el electrodepósito de cinc va creciendo de forma irregular con una estructura ramificada, en lugar de dar un depósito totalmente compacto en el espacio idealmente bidimensional donde se desarrolla, en cuyo caso la dimensión fractal coincidiría con la euclídea.

Pero, ¿cuál es el *mecanismo* que subyace bajo el fenómeno de la electrodeposición fractal? Aunque no se conoce bien del todo, intervienen en el mismo el transporte por *migración*, por *difusión* y tal vez por *convección* de iones, que se encuentran en la fase de disolución. Participan también otros procesos de tipo *electródico* (transferencia de carga), que se desarrollan en la interfase móvil que el electrodo delimita en su avance irregular en el seno de la disolución. Es evidente que la migración, por efecto del campo eléctrico aplicado, opera en una escala de longitud macroscópica asociada a la dimensión longitudinal de la celda. La difusión, por otra parte, interviene como consecuencia de los gradientes de concentración de la especie electroactiva que la propia deposición provoca y lo hace típicamente en una escala de longitudes mucho menores. La interacción entre estas diferentes escalas podría explicar la intrincada geometría de los depósitos.

Resulta sumamente complejo incorporar dicha variada fenomenología en un modelo matemático cuyas ecuaciones sean susceptibles de resolución analítica o numérica. El concurso del ordenador, a través de la utilización de apropiadas rutinas de simulación, se hace pues imprescindible. En último término, la semejanza, a menudo incluso sorprendente, de los agregados obtenidos por *simulación* con los experimentales, permite comprobar la verosimilitud de los principios y parametrizaciones del modelo de ordenador. El algoritmo que suele emplearse es el de *agregación limitada por difusión*; se basa éste en la agregación de partículas de la disolución metálica sobre una semilla inicial, ya sea puntual ya extensa, por simple contacto tras un recorrido de dichas partículas al azar desde posiciones inicialmente remotas del agregado. Este movimiento *browniano* permite operar lo mismo en un espacio reticulado ("on-lattice") que sin cuadricular ("off-lattice").

Por último, señalaremos que el estudio del fenómeno aquí descrito, aparte de su interés intrínseco en tanto que provoca el crecimiento de estructuras dotadas de propiedades físicas y matemáticas singulares, presenta además notorias implicaciones en una gran variedad de problemas químicos actuales. Dentro de la temática general de los procesos heterogéneos que tienen lugar en superficies e interfases, recordaremos los relativos a procesos de corrosión y fractura, tratamiento electroquímico de superficies, además de toda la amplia problemática referente a la catálisis heterogénea. (F. Sagués y J. M. Costa, de la Universidad de Barcelona.)



2. AGREGADO BIDIMENSIONAL desarrollado por ordenador, mediante un algoritmo basado en el modelo de agregación limitada por difusión. *Las "partículas" se dirigen desde sus posiciones iniciales hacia la base, siguiendo un camino al azar, y desarrollan el objeto* fractal *de la figura. Los colores, arbitrarios, señalan el orden de llegada de las partículas; primero se depositaron las partículas que aparecen "marrones", luego las "verdes", en tercer lugar las "amarillas", a las que siguieron las "lilas", las "rojas" y, por último, las "azules". Simulación realizada por los autores en la Universidad de Barcelona.*

Cosecha de homeobox

Cuando un esbozo de tejido de un embrión madura espontáneamente en un brazo completamente formado, lo hace siguiendo órdenes. Estas órdenes las imparten genes homeobox, una familia de genes "maestros" que asigna el destino del desarrollo. Los genes homeobox, característica ubicua de hongos y animales pluricelulares, podrían hallarse también en las plantas.

Un equipo de investigadores del Centro de Expresión Genética del Departamento de Agricultura de los EE.UU. y de la Universidad de California en Berkeley acaban de hacer público su descubrimiento: genes vegetales homeobox. Van más allá y afirman que esos genes constituyen un grupo universal de reguladores que, por más de mil millones de años, han venido dictándoles a las células en qué tenían que acabar.

A lo largo de los años ochenta, genéticos y embriólogos advirtieron que ciertas mutaciones, muy complejas, que se operaban en la mosca del vinagre tenían su raíz en determinados genes. Esas mutaciones homeóticas, así se las llamó, eliminaban segmentos corporales enteros o provocaban la aparición de extremidades en lugares insólitos. Los mutantes *Antennapedia*, por ejemplo, tenían patas donde debieran haber tenido antenas. Los genes mutados parecían supervisar la actividad de otros genes y, a través de ellos, la diferenciación de grupos enteros de células durante el desarrollo.

La investigación posterior reveló que muchos de los genes responsables de las mutaciones homeóticas mostraban un estrecho parecido a lo largo de cierta secuencia, la secuencia homeobox. Con otros estudiosos William J. McGinnis, ahora en la Universidad de Yale, demostró posteriormente que podía haber genes homeobox muy similares en todo el reino animal y hasta en las levaduras. Pero, curiosamente, los múltiples intentos por observarlos en plantas dispares fracasaron sin remedio.

No los buscaba, sin embargo, el equipo de Sarah Hake, de Berkeley, aunque tampoco se sorprendieron cuando un gen homoebox les salió al paso. Estaban trabajando en cierta mutación del maíz, la llamada *Knotted* (nudosa). Las hojas de los mutantes *Knotted* están desfiguradas por nudos, o protuberancias arremolina-

das de las vasos laterales. Los nudos "parecen formar un grupo de células que continúan dividiéndose, rodeadas por otras células que han dejado de hacerlo", explica Hake. "Divergen de los tumores. Todas las células se encuentran en una lámina sana y bien definida. Imagínese usted un niño que intenta con el dedo hacerse un siete en el jersey."

Las células de las vasos laterales que han dejado de dividirse son anormales: poseen características de células de la vaina, o base de la hoja. Asimismo, en los mutantes *Knotted* la lígula (una pequeña balda de tejido epidérmico que normalmente se encuentra entre la hoja plana y la vaina) crece en la misma hoja.

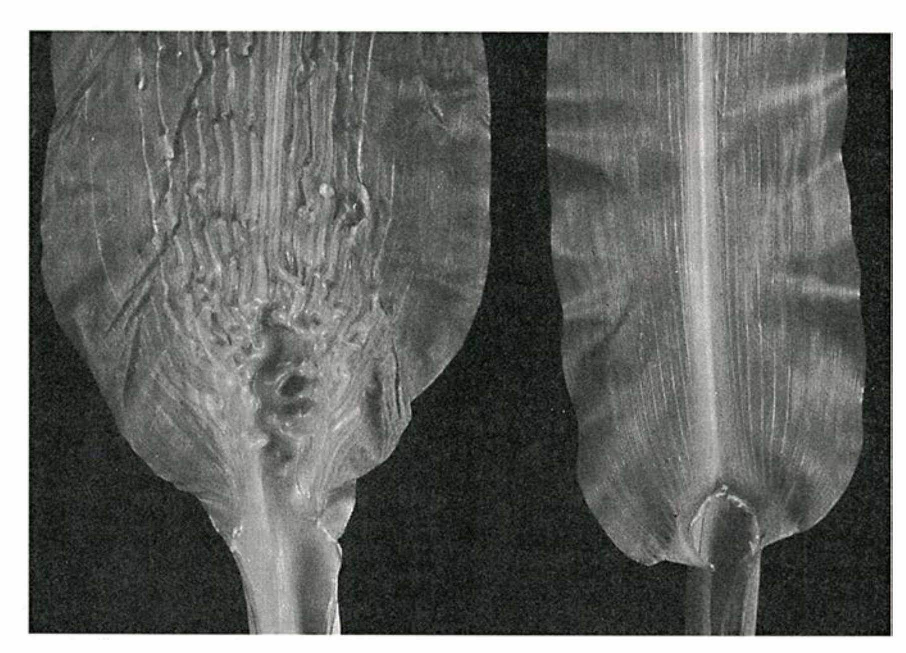
Para el grupo de Hake, todos los rasgos del mutante vendrían causados por células que exhiben un comportamiento normal en sitios impropios o en momentos inadecuados. Como tales, recordaban las mutaciones homeóticas observadas en la mosca del vinagre. "Las lígulas en un sitio impropio no ofrecen la espectacularidad de las mutaciones *Antennapedia*", comenta, "pero, en cierto sentido, son análogas".

Tras varios años de trabajo, el grupo de Hake consiguió identificar el gen responsable de la mutación *Knotted*. Dedujeron la secuencia de aminoácidos que determinaría y la compararon con las de otras proteínas conocidas. Había, en efecto, suficientes similaridades entre la proteína codificada y los productos de genes homeobox para que Hake clasificara el gen *Knotted* entre los que contenían un homeobox.

Recapitulando, señala Hake, resulta claro por qué fracasaron los intentos previos en busca de esos genes en las plantas. El método habitual implicaba la técnica de hibridación cruzada, en la que hebras de ADN complementarias de un homeobox servían de sondas para otras. Sin embargo, la divergencia entre secuencias de ADN vegetal y animal es tan grande que las moléculas sonda basadas en genes animales no se podían adherir a los genes vegetales. "Con la existencia ya de un motivo vegetal conocido, resultará más fácil obtener genes homeobox vegetales." Hake y su grupo han identificado varios homeobox más en el maíz, tomate y arroz.

Aunque los genes homeobox vegetales difieren bastante de los que se encuentran en animales y hongos, las semejanzas siguen sugiriendo que todos los homeobox descendieron de un gen en el antepasado común de los organismos, que vivió hace mil millones de años. El papel de un gen de tales características ("homeoboxoide") en este antepasado unicelular es motivo de especulación. Cabe la posibilidad, señala McGinnis, de que el gen regulara la transformación de aquellos organismos unicelulares en varias formas distintas. Una vez hubo evolucionado la pluricelularidad, pudo haberse orientado esa función hacia la producción de diferentes tipos celulares en distintas regiones del cuerpo.

El descubrimiento de los genes en las plantas continúa definiendo el rango de actividades por ellos reguladas, añade Matthew P. Scott, un pionero de la investigación de homeobox en la Universidad de Stanford. "La cuestión central es muy importante. ¿Por qué un determinado tipo de molécula reguladora se halla implicado en un determinado proceso?" Y prosigue: "¿Se trata de un mero accidente histórico que establece cuáles de estos tipos de proteínas se hallan implicados?" O, como Shakespeare podría haber expresado: ¿Por qué eres tú, homeo?



3. MAIZ MUTANTE KNOTTED (izquierda) *y su correspondiente versión normal* (derecha). *La anomalía se da en un gen homeobox que regula la diferenciación y provoca que algunas células foliares expresen rasgos indebidos. Fotografía: Bruce Veit.*

Ahí está la dificultad

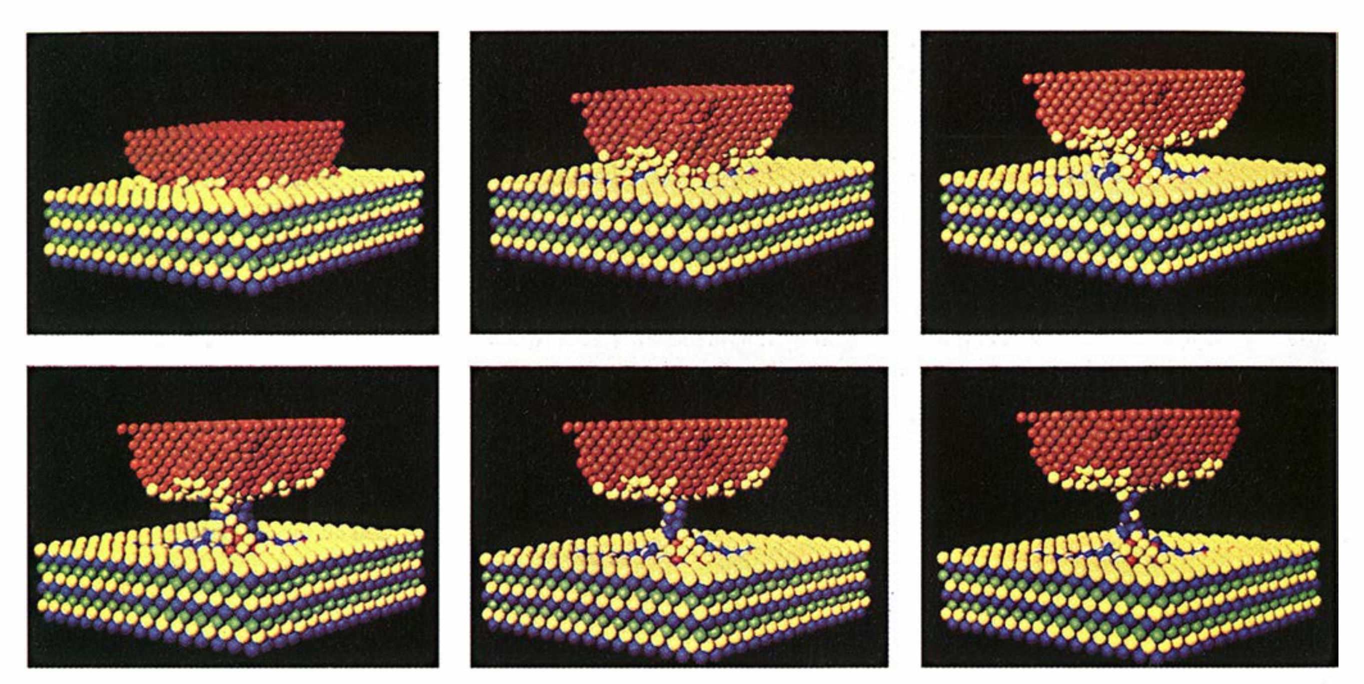
Se está abriendo camino el estudio de modelos atómicos del rozamiento, que tiene sólido apoyo en la microscopía de alta resolución y la potencia de los grandes ordenadores. Pero, al abordar la dinámica molecular del rozamiento, los investigadores se han encontrado con resultados sorprendentes.

Uzi Landman y William D. Luedtke, físicos del Instituto de Tecnología de Georgia, y Nancy A. Burnham y Richard J. Colton, químicos del Laboratorio de Investigación Naval de Washington, investigaron las interacciones moleculares que se producían al pegar dos objetos entre sí. Se sirvieron de dos herramientas: simulaciones de ordenador y microscopio, éste para ver qué ocurría cuando la punta de una sonda mínima de níquel se aproximaba a un substrato de oro. El microscopio medía las fuerzas desarrolladas entre dos substancias separadas por menos de un angstrom (10 nanómetros).

Los sistemas que fueron objeto de estudio constaban de unos 7000 a 12.000 átomos; "podían", nos aclara Landman, "captar con toda exactitud los procesos que acontecían en la escala del nanómetro". "A cierta distancia entre la punta y la superficie, a unos 4,25 angstroms, se presenta una inestabilidad": algunos átomos de oro brincan hacia el níquel, adhiriéndose y "humedeciendo" la parte inferior del metal.

Al alejar la punta de níquel del contacto con la superficie de oro, llueven más sorpresas. Entre ambos metales se forma un tenue hilo atómico, que, al romperse, acaba dorando la punta de níquel con los átomos que faltan en la superficie de oro así alterada.

Landman culpa de ese fenómeno a las diferentes energías del níquel y del oro. La energía superficial es la energía que una substancia invierte en crear una superficie. "Comparada con la del níquel, la energía superficial del oro es pequeña; en virtud de



4. ROZAMIENTO ATOMICO *entre una punta de níquel* (rojo) *y la superficie de oro* (capas amarillas, azules y verdes) *descrito por una simulación de ordenador. La secuencia de sucesos empieza con el contacto entre la punta de níquel y la superficie* (izquierda, arriba). *A medida que vamos alejando la punta, se va creando una unión intermetálica hasta acabar los átomos de oro "empapando" la punta de níquel.*

ello, la superficie del niquel queda recubierta por el oro, y no al revés."

La formación de uniones intermetálicas (el cuello estirado de níquel y oro) constituye la base microscópica que explica el fenómeno macroscópico de la adhesión y del rozamiento. Landman recuerda que nunca se juntan en plena lisura dos superficies, razón por la cual el mecanismo atómico que permite la formación de estas uniones es fundamental para comprender la resistencia a los deslizamientos horizontales.

El desarrollo de este campo, o de la ciencia de la tribología, habrá de abocar en la creación de diseños racionales de lubricantes. Jacob N. Israelachvili, ingeniero químico de la Universidad de California en Santa Bárbara, pone sordina a cualquier euforia cuando rememora peligros de la intuición que se alimenta de sólo estudios globales. Antes de entender el comportamiento de los materiales en la escala del nanómetro, se otorgaba el sello de buen lubricante a las substancias que se distinguían por su gran viscosidad.

Israelachvili y sus colegas investigaron finas películas líquidas de hidrocarburos, de una a tres capas atómicas, colocadas entre dos superficies. Descubrieron que la capacidad de lubricar dependía de las bifurcaciones de las cadenas moleculares. "Se nos ofrece una geometría molecular en que las moléculas de los hidrocarburos se entrelazan fuertemente con las moléculas vecinas de las superficies", comenta. El lubricante actúa como una barrera evitando la formación de uniones entre las dos superficies.

El desentrañamiento molecular de la fricción podría llevar a revestir las substancias con capas finísimas, átomo a átomo. Tal posibilidad de manipulación individual de los átomos, que alcanza hoy a dibujar las letras *I*, *B* y *M*, permitiría la estabilización de tales configuraciones. Estabilizar o proceder al remiendo microscópico de superficies alteradas que lo requieran. De momento, la ciencia puede ufanarse de haber explicado los mecanismos subyacentes bajo los fenómenos de rozamiento.

John A. Wheeler: ¿qué es la realidad?

No es fácil ir al paso de John Archibald Wheeler. Cuando abandona su despacho, en el tercer piso de la Universidad de Princeton, para almorzar algo, huye del ascensor. "Son peligrosos para la salud", afirma, mientras se lanza escaleras abajo. Con una mano en la barandilla aprovecha su fuerza centrífuga en cada descansillo parar girar e iniciar con celeridad el siguiente tramo de escalera. "¿A ver quién baja más deprisa?", me reta.

Ya en la calle, Wheeler no camina, corre. Mueve sus brazos en acorde rítmico con su paso ligero. Sólo se detiene ante cada puerta que debemos cruzar; entra con decisión y la aguanta abierta franqueándome el paso. Una vez dentro, me detengo un momento en deferencia a este físico emérito de la Universidad de Princeton y de la de Texas en Austin, que este mes de julio cumple 80 años. Y Wheeler reanuda su marcha firme.

Cuando se escribe que Wheeler va siempre delante, abriendo puertas, la metáfora se cruza con la realidad. A él se debe la credibilidad de las ideas revolucionarias de la física contemporánea: desde la teoría de los agujeros negros hasta las teorías de universos múltiples. "Posee la rara habilidad de ir al nudo de la cuestión antes que nadie y de persuadir de su importancia a los demás", reconoce David Deutsch, físico de la Universidad de Oxford.

A Wheeler se le admira también su agudeza mental, su chispa y multitud de recursos, propios o adoptados. De cosecha ajena son estas sentencias: "Si no puedo dibujarlo, es que no lo entiendo" (Einstein); "El unitarismo —confesión religiosa de Wheeler— es una cama de plumas que acoge a los cristianos caídos" (Darwin); "Nunca corras tras un autobús, una mujer o una teoría cosmológica, porque al momento habrá otra disponible" (cierto profesor de historia francesa de Yale). De cosecha propia: "Si no te ha sorprendido nada extraño durante el día, es que no ha habido día" (Wheeler).



5. EL COSMOS de Wheeler es participativo. Fotografía de J. Pinderhughes.

Y hacia algo extraño ha dirigido ahora Wheeler la atención de sus colegas. Se refiere a la información y su afán de maximizar transmisión y procesamiento de datos mediante la mecánica cuántica. Con su viveza característica ha resumido la idea en tres palabras: "it from bit".

Wheeler podría haber sido tachado de frívolo si no tuviera a sus espaldas una biografía fuera de lo común. Hijo de padre y madre bibliotecarios interesados por las ideas, el mundo en que vivían y las aventuras, desde muy pronto conoció el placer de la lectura, cuyo hábito adquirió. A los 16 años entró en la Universidad Johns Hopkins de la que salió, seis años más tarde, con el doctorado de física bajo el brazo.

Viajó a Copenhague para estudiar con Niels Bohr, "el físico con mayor visión de futuro", según escribió Wheeler en su solicitud de beca. En 1939 Bohr y Wheeler publicaron el primer artículo conjunto, donde aportaban la explicación mecánico-cuántica de la fisión nuclear. El profundo conocimiento que Wheeler poseía en física cuántica fue razón para reclamarle en la preparación de la bomba atómica durante la segunda guerra mundial y, en los albores de la guerra fría, en la bomba de hidrógeno.

Tiene fama de que tras su comportamiento travieso se esconde un corazón de acero. Lo noté al preguntarle a bocajarro qué sensación guardaba de su participación en el desarrollo de armas nucleares. Su rostro se tornó grave: "Muchos amigos míos se han manisfestado contrarios, pero yo no me avergüenzo". Habla convencido de que salvaron muchas vidas al acabar con el conflicto y sirvieron, más tarde, para pararle los pies al expansionismo socialista.

Al concluir su compromiso con el proyecto de la bomba H, Wheeler volvió a sumergirse en el estudio de la relatividad y la gravitación, "el amor de su vida", en Princeton. En 1966 propuso que la nebulosa del Cangrejo, una brillante nube de gas, recibía su luz de una esfera de neutrones en rotación, creada por la implosión de una estrella. Los astrónomos detectarían más tarde una tal estrella de neutrones en rotación, o púlsar, en la nebulosa del Cangrejo y en otras zonas de la Vía Láctea.

Wheeler ha dejado también vagar su mente por el colapso de la materia, incluso en estados más allá de los neutrones sólidos, que le conferirían tal densidad que nada, ni la misma luz, podría escaparse. Estos objetos, propuestos con anterioridad por J. Robert Oppenheimer y Hartland S. Snyder en 1939, se abandonaron por reputarse mera curiosidad teórica, sin visos de existencia.

Hablando de esos objetos en absoluto colapso gravitacional se hallaba en cierta conferencia celebrada en 1967, cuando alguien de la sala dejó caer la expresión "agujero negro". Wheeler comprendió de inmediato el valor de estas dos palabras por su brevedad y poder comunicador y las adaptó como algo propio. Debido en buena medida a su tenacidad, los agujeros negros desempeñan hoy un papel crucial en astrofísica.

Durante los años cincuenta, se sintió atraído por las implicaciones filosóficas de la física cuántica. De acuerdo con la teoría, una partícula, pensemos en un electrón, ocupa numerosas posiciones en el espacio hasta que, al observarla, "se colapsa" en una sola. Wheeler fue uno de los primeros físicos, revestido de suficiente autoridad, que propuso que quizá la realidad no constituyera un fenómeno físico puro. Podría emerger del acto de la observación y del conocimiento: la realidad sería una entidad "participada".

Estas reflexiones inspirarían dos de las nociones más singulares que se han traído y llevado en la física moderna. En 1957, Hugh Everett III, de Princeton, avanzaba, en su tesis doctoral dirigida por Wheeler, la teoría de los mundos múltiples: aunque podemos observar una partícula en una sola posición, en realidad ocupa todas las posiciones permitidas por la mecánica cuántica, aunque en universos diferentes. Cuatro años más tarde, otro físico de Princeton, Robert H. Dicke, introducía el principio antrópico, según el cual el universo ha llegado a ser lo que es, y no otra cosa, porque nosotros podemos observarlo. Aunque muchos físicos creen que estas ideas no pueden comprobarse y, por ende, no son rigurosamente científicas, Wheeler reclamó la consideración hacia las mismas.

Y ello, al tiempo que llamaba la atención de sus colegas sobre las intrigantes relaciones entre la física y la teoría de la información, propuesta por Claude E. Shannon, de los laboratorios Bell, en 1948. Lo mismo que la física se construye a partir de una entidad elemental, indivisible y dependiente del acto de observación, el cuanto, así se levanta la teoría de la informción sobre su "cuanto", que es el bit, o unidad binaria; es éste un mensaje con dos opciones, a saber, cabeza o cola, si o no, uno o cero.

La teoría de la información ofrece, además, otra perspectiva de la entropía, concepto confuso donde los haya. Se la describe como el desorden, el grado de confusión, de aleatoriedad de un sistema. Shannon había propuesto que la información de un sistema dado, la suma total de sus posibles mensajes, era función de su entropía; cuando aumentaba una lo hacía la otra. Wheeler señaló que la entropía, igual que el acontecimiento cuántico, se hallaba ligada al estado cognoscitivo del observador. La información potencial de un sistema era proporcional a la ignorancia sobre el mismo y, por tanto, a la entropía del sistema.

Aunque no fue el único en advertir esos lazos, sí lo fue "probablemente" en reconocer las implicaciones potenciales en la física fundamental, opina Wojciech H. Zurek, del Laboratorio Nacional de Los Alamos. A comienzos de los setenta, la especulación de Wheeler dio su fruto más sabroso cuando Jacob Bekenstein, uno de sus alumnos, describía un agujero negro mediante la teoría de la información. El área superficial del horizonte de sucesos del agujero negro coincide con su entropía termodinámica, que, a la vez, equivale a la información que el agujero negro ha consumido.

Espoleado por este y otros descubrimientos, un grupo creciente de informáticos, astrónomos, matemáticos y biólogos, además de físicos, han pasado el umbral de las puertas abiertas por Wheeler. En la primavera del 1989, un buen número de ellos se reunió en el Instituto Santa Fe en Nuevo México para hablar de los avances operados, de sus propios progresos. Las actas de la reunión se publicaron en un libro que lleva por título *Complexity, Entropy and the Physics of Information*.

El capítulo introductorio recoge la conferencia dictada por el propio Wheeler. Aunque no la firmara, lo delataría su estilo único: en 16 páginas, cita 175 fuentes, desde Parménides hasta Einstein pasando por Shakespeare, Leibniz, etc. y el anónimo del servicio de caballeros del café de la calle Pecan de Austin, que reza así: "el tiempo es la forma de la naturaleza que impide que todo ocurra a la vez". Expone lo que no es la realidad: "no es una máquina gigante gobernada por una ley física prestablecida", incluso carece de dimensión, tal como el espacio o el tiempo.

¿Qué es la realidad? A lo que responde sibilino: "it from bit". Y apostilla con la esfinge: cada "it", es decir, cada partícula, cada campo de fuerza e incluso el propio continuo espaciotemporal, extrae su función, su significado, su completa existencia (en determinados contextos indirectamente) de las respuestas emitidas por los instrumentos ante cuestiones del tenor si o no, ante opciones binarias, ante bits.

Mientras da vueltas a esa idea, trae a colación su versión "sorpresa" del juego de las veinte preguntas. En la versión normal del mismo, el jugador A piensa en un objeto —animal, vegetal o mineral— y B se presta a identificar lo pensado por A mediante una serie de preguntas de respuesta lacónica, si o no. En la versión "sorpresa", A decide su objeto *tras* la primera pregunta de B. Más. Puede ir cambiando de objeto mientras sea compatible con la elección de las respuestas anteriores. Eso pasa con la realidad, sugiere Wheeler. Se va definiendo acorde con las preguntas que le vamos formulando.

¿Qué reacción provocan en sus colegas las afirmaciones de Wheeler? Zurek, organizador del encuentro de Santa Fe y encargado de publicar las actas de las sesiones, califica su estilo de "profético: más que recapitular ideas trilladas, señala nuevos derroteros".

Wheeler reconoce que a estas ideas les falta elaboración, el grado de madurez necesario para someterlas a pruebas rigurosas. El y sus colaboradores se hallan todavía en la fase de acotar el campo y buscar la forma de convertirlo al lenguaje de la teoría de la información. Ese empeño, comenta, podría terminar en un vigoroso enfoque del "todo" o acabar en nada. "Me gusta parafrasear a Bohr: debemos estar preparados para una sorpresa, una gran sorpresa."

Nos repite otra frase favorita suya: "sólo se aprende enseñando". Wheeler ha dirigido más de 50 doctorados en física durante su carrera. Su alumno más famoso fue Richard P. Feynman, que recibió el premio Nobel de física en 1965 por su trabajo en electrodinámica cuántica. La edad le impide seguir dando clases.

Pero él no se resigna a dejar de enseñar ni de aprender. Durante nuestra visita estuvimos con otro físico cuya hipótesis cosmológica habla de un mundo acribillado de defectos espaciales puntuales. "No puedo creerme que el espacio valga tan poco", replica Wheeler. Advirtiendo el gesto de abatimiento del físico, Wheeler le da unas palmaditas y le anima: "Detestar es estudiar, estudiar es comprender, comprender es apreciar, apreciar es gustar. Quizá tu teoría acabará gustándome." La sonrisa vuelve al rostro del físico, mientras el enviado de *Investigación y Ciencia* se despide de Wheeler.

Ciencia y empresa

Cuestión de peso

Las tarjetas de memoria constituyen el nervio de los ordenadores portátiles. Pero, ¿por qué tienen éstos que pesar tres kilos? Se responderá que la mitad del peso se lo llevan las baterías que alimentan la operación del control mecánico del disco que permite almacenar datos. Cabe, sin embargo, otra vía alternativa. Los fabricantes de circuitos integrados y de ordenadores están empeñados en crear una forma de memoria permanente, libre de los inconvenientes que presentan los soportes de registro magnético.

La solución podría venir de las tarjetas de memoria, que son paquetes de microcircuitos de silicio. Del tamaño de una tarjeta de crédito, aunque algo más gruesas, las tarjetas de memoria almacenan programas y datos. Son menores, más rápidas y más ligeras que los controles mecánicos de disco empleados por los ordenadores portátiles y de sobremesa. Los datos almacenados en los microcircuitos se pueden recuperar rápidamente con muy poco consumo de energía. Con las nuevas normas de diseño de equipos y programas, las tarjetas de memoria compatibles transformarán radicalmente el significado de "portátil".

Existe ya algún ordenador personal portátil con tarjeta de memoria. En Estados Unidos, por ejemplo, se vende el Poqet PC fabricado por Poqet Computer Corporation de Santa Clara, California. El ordenador, compatible con IBM y del tamaño de una vídeocassette, cuesta unas 100.000 pesetas y puede funcionar, gracias a dos pilas alcalinas, durante 100 horas. El modelo podría verse pronto acompañado por una veintena más. Los profesionales del sector creen que los prototipos que caben en la palma de la mano, como el Poqet, engordarán hasta asimilarse al modelo que Fujitsu ha empezado a exportar en el Japón (del tamaño de una agenda de sobremesa).

Conforme las tarjetas vayan almacenando y procesando mayor información, ensancharán el radio de aplicación de los ordenadores personales. Aparte de las hojas de cálculo y los programas de tratamiento de textos, los ingenieros sueñan con módulos conectables que ofrezcan mapas de carreteras, listas de restaurantes y hasta periódicos. Las tarjetas de memoria a medida han hallado ya aplicaciones industriales en vuelos de pruebas de aviones y control de inventarios. No hace muchos años se introdujeron en sintetizadores de música, cartuchos de vídeojuegos, aprendizaje de pronunciación y agendas.

Las tarjetas de memoria siguen siendo caras, con 35.000 pesetas por megabyte de capacidad. Pero caerán pronto al aumentar la oferta. Cuando Poqet se decidió por la tarjeta de memoria en 1988, la mayor de ellas podía contener 512 kilobytes y costaba 55.000 pesetas. Bajaron porque la demanda se multiplicará por cinco, de cumplirse las estimaciones de los estudios de mercado.

El primer escollo grave que ha habido que superar ha sido el de la normalización, estándar que se resume en el acrónimo PCMCIA, que en inglés designa a la asociación internacional de ordenadores personales con tarjeta de memoria. Cada uno iba al comienzo por libre. Hoy, un triunvirato de fabricantes de semiconductores, programas y ordenadores personales está haciendo campaña para meter en la cabeza de todos la tarjeta de memoria. Entre las compañías que han seguido esta tecnología están Apple, Chips and Technologies, Databook, Du Pont, Epson. Fujitsu, GRiD, Hitachi IBM, Intel, Kodak, Lotus, Maxxell, Microsoft, Motorola, NEC, Oki, Semiconductor, Phoenix, Polaroid, Samsung, Sharp, Texas Instruments y Toshiba. Las alianzas estratégicas están a la orden del día.

Bajo la norma de PCMCIA, los conectores en las tarjetas de memoria tendrán todos 68 agujas; cada una corresponde a una señal discreta de almacenamiento de datos. Se reserva alguna para futuros usos, tales como funciones periféricas, como los modems. No es casualidad que la norma de distribución de agujas coincida con la propuesta por la Asociación de Desarrollo de la Industria Electrónica del Japón (JEIDA) en 1985. Los fabricantes occidentales querían un acuerdo y lograr que cualquier máquina que emplease el sistema operativo corriente MS-DOS (por ejemplo, los PC de IBM) pudiera usar cualquier tarjeta.

De la misma manera que se están desarrollando diferentes funciones para las tarjetas de memoria y de entrada y salida, los fabricantes de semiconductores están ensayando con diversos métodos de almacenamiento de datos. Los circuitos integrados de memoria ("chips") usados en la mayoría de los ordenadores, conocidos como DRAM ("Dynamic Random Access Memory", o memoria de acceso aleatorio dinámico), no son apropiados para almacenamiento permanente porque no retienen los datos cuando se desconecta el ordenador.

La estrella ascendente entre los sistemas de almacenamiento de datos es la memoria relámpago, o Flash; muchos lo consideran el mejor sistema para las tarjetas de memoria. No necesita batería para mantenerla y se puede reprogramar eléctricamente.

El inconveniente de Flash es que hay que borrarlo por sectores. En lugar de variar un mensaje de "Hola, Sara, ¿cómo estás?" a "Hola, Sito..." simplemente cambiando el nombre, Flash guardará un documento entero, consumiendo valioso espacio. Algunas compañías se esfuerzan en salvar esa limitación borrando bloques cada vez menores; otras fían en los programas para que se cuiden de borrar lo sobrante cuando el usuario está trabajando en otra zona de la tarjeta.

Cada clase de pastilla requiere su propio modo de almacenamiento de datos. A fin de superar este obstáculo para la intercambiabilidad, PCMCIA y JEIDA se pusieron de acuerdo en normalizar un "Metaformato", o indicador lógico que describe, para cualquier máquina adaptada al mismo, el contenido del disco y su organización interna. El problema estriba, sobre todo, en la compatibilidad de medios entre las versiones antiguas y las más modernas de MS-DOS.

Todavía hay dificultades que allanar, pero es seguro que el campo avanzará con el perfeccionamiento de las tarjetas de memoria. Las empresas agresivas y rápidas ganarán dinero a corto plazo, hasta que los costes de fabricación inevitablemente se conviertan en el más exigente criterio de supervivencia.

Lectura a sorbos, byte a byte

Primero apareció la reproductora de cintas portátil Sony Walkman. Después, cuando los discos compactos arrasaron en el mercado de la música, el gigante electrónico japonés lanzó el Discman. Su última apuesta (de momento) en electrónica de consumo: ofrecer datos en vez de decibelios. El Data Discman comprime 200.000 páginas de texto en los discos relucientes reservados para los rockeros de moda o las perennes fugas de Bach.

Apenas se ha expuesto en el mercado nipón, y se han vendido ya 100.000 reproductoras Data Discman, compitiendo con los valores seguros de Sony, tales como la videocámara



de ocho milímetros tamaño pasaporte. Impulsada por el entusiasmo de los consumidores, Sony puede tratar de introducir el Data Discman en Occidente para las campañas de Navidad.

La idea del Data Discman nació hace tres años, cuando los ingenieros de Sony comprobaron el éxito de las agendas electrónicas de bolsillo entre los jóvenes empleados.

Del laboratorio de proyectos salió una versión modificada del tocadiscos compacto portátil de Sony. El Data Discman lee la información de discos compactos de sólo lectura (CD-ROM), que pueden almacenar 200 megabytes de datos. Los usuarios mecanografían preguntas en un teclado enano y leen la información en la pantalla de cristal líquido que lleva incorporada.

Se pretende, sin embargo, eludir cualquier asociación con los ordenadores personales. No es probable que nadie lea de cabo a rabo una obra maestra de la literatura en un Discman, pero el usuario puede aprovechar la capacidad de búsqueda del producto en diccionarios, libros de frases y guías médicas y turísticas para tener los datos a mano.

Para asegurarse de que el material de soporte estuviera disponible cuando el equipo llegara al mercado, la compañía puso en fila a un rosario de editores que se comprometieron a apoyar el disco normalizado de Sony. El soporte lógico (software), explican, constituye la clave para definir el empleo de la información del disco y su presentación ante el usuario. Los Data Discman almacenan un programa único de recuperación de datos que ofrece hasta seis estrategias para hallar información en los discos.

Los libros electrónicos están organizados a imagen de los textos tradicionales, con su sumario, índice de materias e índice alfabético. En este momento, 63 editores japoneses, fabricantes de electrónica y otras empresas han entrado en ese círculo, y ya se han publicado más de una treintena de libros en ese formato. Predominan las obras de referencia, destinadas a hombres de negocios.

La prueba del fibrinógeno

Por si no bastaran la tensión sanguínea, el colesterol, el tabaco y el exceso de peso, he aquí otro factor potencial de riesgo de enfermedad cardíaca: el fibrinógeno. Este factor de coagulación de la sangre circula por el cuerpo en busca de lesión que reparar con un tapón o coágulo. Pero la proteína ha menudeado últimamente su presencia en otro dominio menos benefactor, el que asocia su elevada concentración con ataques y cardiopatías.

"Existe un gran interés por el asunto", reconoce John C. Hoak, director de hematología del Instituto Nacional de Corazón, Pulmones y Sangre de Bethesda. Pero el río de estudios que insinúan una correlación podría estar creando alarmas infundadas. Nadie puede afirmar con certeza si los altos niveles de fibrinógeno causan las cardiopatías o se trata de meros testigos presenciales.

La incertidumbre científica no ha frenado el trabajo empresarial de Henry L. Nordhoff, presidente de una compañía de biotecnología que tiene contrato con la Universidad de Notre Dame de Indiana. "Debería incluirse el fibrinógeno en los reconocimientos médicos rutinarios", afirma, corroborando sus palabras con distintos trabajos realizados en los EE.UU., el Reino Unido y Suecia, que llegan a la conclusión de que el fibrinógeno es un factor de riesgo.

La empresa de Nordhoff prepara una prueba rápida y altamente específica para detectar el fibrinógeno. Espera que los grandes hospitales adquieran Cadkit, nombre comercial del ensayo, que se emplearía en los analizadores automáticos de alto volumen que se encuentran en los laboratorios clínicos. Se trabaja también en una versión apta para ambulatorios, que opera con tejido sanguíneo completo. Podría servir para el seguimiento de pacientes con infarto sometidos a terapia de disolución de trombos.

Una de las investigaciones que culpan al fibrinógeno es la misma que desenmascaró al colesterol. El estudio de Framingham, que desde 1948 ha seguido la salud cardíaca de los residentes en esa ciudad de Massachusetts, midió los niveles de fibrinógeno una sola vez, en 1968, entre 1315 personas libres de enfermedades cardiovasculares. Del registro se infiere que los individuos con valores más altos de fibrinógeno a lo largo de cierto tiempo son también los que corren mayor peligro de sufrir problemas de arterioesclerosis.

Para determinar el nivel de fibrinógeno se recurre, en el proceso habitual, a ensayos funcionales que añaden trombina a una muestra de plasma sanguíneo. La trombina convierte el fibrinógeno en fibrina, principal componente de los trombos insolubles. Cuanto más prisa se da el coágulo en formarse, mayor cuantía de fibrinógeno hay. Existe otro método más refinado que usa anticuerpos monoclonales, pero el proceso de coagulación libera metabolitos que pueden obscurecer los ensayos inmunoquímicos.

La empresa de Nordhoff confía en una nueva técnica para fabricar anticuerpos monoclonales que presentarán mayor especificidad hacia el fibrinógeno. En vez de aislar células que producen anticuerpos de los ratones de laboratorio, la compañía crea sus anticuerpos en ratones que han sido inmunológicamente aislados durante generaciones.

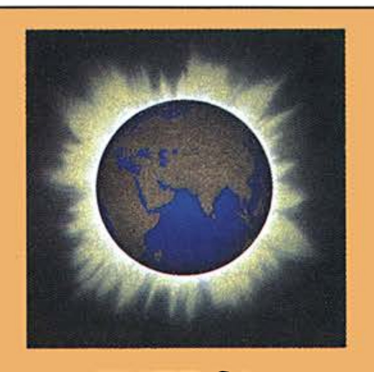
Se trata de ratones que han desarrollado muy pocos anticuerpos propios, lo que provoca una respuesta altamente específica ante la presencia, por inyección, de un determinado antígeno, en este caso fibrinógeno humano. Una de cada 48 células del bazo de esos ratones segrega anticuerpos contra el fibrinógeno, frente a una de cada 60.000 células de los ratones normales. Las células se cultivan después para proporcionar cantidades comerciales del anticuerpo, que posee una reforzada capacidad para distinguir entre fibrinógeno y fibrina.

Sometidos a una prueba precisa, los pacientes con altos niveles de fibrinógeno podrían reducir a sus justas proporciones otros factores de riesgo, el tabaco, por ejemplo. Los fumadores podrían tomar fármacos reductores del fibrinógeno, sugieren en la empresa.

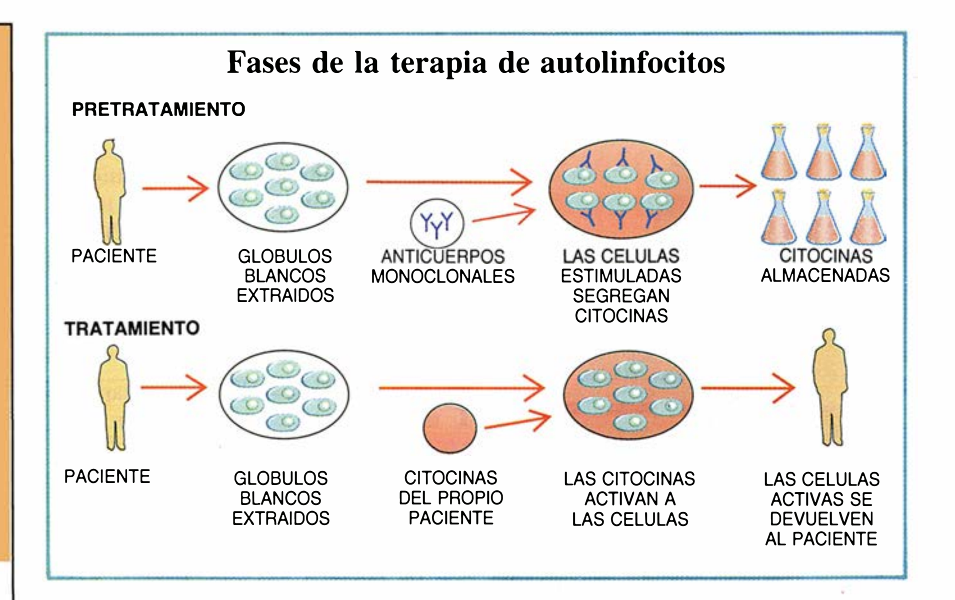
Venta de células

El cáncer de riñón se cobra al año muchos miles de víctimas. ¿Qué medidas tomar? La quimioterapia no es el bálsamo curalotodo que se había anunciado. Su eficacia no llega al 10 por ciento.

Algunas empresas de biomedicina se están afanando en la solución. Es el caso de la norteamericana Cellcor Therapies, asentada en el estado de Massachusetts, que piensa lanzar al mercado lo que llama terapia de auto-



Fases de la terapia de autolinfocitos



linfocitos (TAL). Por ser una terapia y no un fármaco, se halla libre del control de la oficina federal que entiende de drogas, aunque sí está sujeta a la deontología médica de los colegios profesionales. La compañía, que ha abierto un centro de tratamiento en un hospital bostoniano, proyecta extenderse por el país, confiada en que TAL duplique el tiempo medio de supervivencia de los pacientes sin provocar efectos colaterales. Aunque nadie sugiere que TAL sea peligrosa, hay preocupación por la escasa experiencia clínica que existe en apoyo de su eficacia.

TAL es una inmunoterapia, un método con el que los médicos combaten los tumores reforzando el sistema inmunitario del paciente. La mayoría de las inmunoterapias recurren al interferón y las interleucinas, es decir, a las citocinas que el cuerpo segrega naturalmente para incrementar la función de inmunidad. Pero las dosis terapéuticas de esos medicamentos ni libran de la enfermedad, ni está claro que alarguen la vida de la mayoría de los pacientes.

La clave de la TAL, explica Michael E. Osband, promotor de la misma y cofundador de Cellcor, estriba en que se basa en la célula entera, no en el fármaco. Antes de empezar el tratamiento, los médicos extraen linfocitos, o glóbulos blancos, de la sangre del paciente. Con anticuerpos monoclonales, los técnicos de Cellcor estimulan a los linfocitos a segregar grandes cantidades de citocinas. Transcurridos tres días, los técnicos desechan las células y se quedan con el medio rico en citocinas, que dividen en seis porciones y almacenan.

Una vez al mes durante los seis meses siguientes, el paciente regresa al centro y dona otro cupo de linfocitos. Estas células se añaden a una porción de la mezcla de citocinas. Tras una semana de incubación, los linfocitos activados se infunden en el paciente para atacar las células del tumor.

El estudio más completo sobre el TAL apareció en la revista *The Lancet* en abril de 1990; no había pasado ni un año de la apertura del centro de Boston. Demostrábase en él que los pacientes sometidos al tratamiento sobrevivían en promedio 22 meses, es decir, dos veces y media más que los pacientes sometidos a quimioterapia. Pero los oncólogos no las tienen todas consigo: es el único ensayo aleatorio publicado y sólo se refiere a 90 pacientes. TAL constituye, en su opinión, un tratamiento en fase experimental.

Ni a Cellcor ni a sus escépticos les gustaría repetir la historia de Biotherapeutics. En 1948, esa joven empresa biotecnológica de Tennessee ofreció a los pacientes de cáncer la posibilidad de participar en programas de investigación y recibir tratamiento experimental, pero pagando una cuota. Ante la dureza de las críticas recibidas, Biotherapeutics renunció a esa línea en 1989. Desde Cellcor rechazan las comparaciones, argumentando que jamás han cobrado por técnicas en fase de ensayo. Más. Los responsables de la compañía presumen de que Cellcor es selectiva en la admisión de pacientes: sólo aceptan a los enfermos de cáncer de riñón que se ajusten al perfil de los que fueron beneficiados en los ensayos aleatorios.

Lo incuestionable es que, a medida que la terapia de genes, los trasplantes de médula ósea y otros métodos que trabajan con células vivas se van asentando, la frontera entre el ensayo provisional y el tratamiento aceptado se torna cada vez más borrosa.

La retina de silicio

Un microcircuito basado en la arquitectura nerviosa del ojo proporciona una forma nueva y más poderosa de realizar cálculos

Misha A. Mahowald y Carver Mead

El ojo es la ventana a través de la cual percibimos el mundo que nos rodea. El ojo es también ventana a través de la cual discernimos la forma en que actúa el cerebro. La retina, capa delgada de tejido que tapiza la órbita del ojo, convierte la luz que le llega en señales nerviosas que el cerebro interpreta como imágenes visuales. Este pequeño apéndice del sistema nervioso central debe extraer todos los rasgos esenciales de una imagen visual con gran rapidez y fiabilidad bajo condiciones de iluminación que varían desde la oscuridad de una noche sin luna hasta la luminosidad extrema del sol de mediodía.

La capacidad de la retina para llevar a cabo estas tareas es mayor que la de los más potentes superordenadores. Ahora bien, una por una, las neuronas de la retina son del orden de un millón de veces más lentas que los dispositivos electrónicos y consumen una energía diez millones de veces menor. También operan con mucha menos precisión que los ordenadores digitales. El estudio de la forma en que la retina desempeña su cometido proporcionará una valiosa información sobre los principios computacionales de otras regiones del cerebro menos accesibles.

El cálculo biológico debe, pues, diferir bastante de su contrapartida digital. Con el objeto de estudiar esta diferencia, decidimos construir un microcircuito de silicio ("chip") inspirado en la arquitectura nerviosa y en el funcionamiento de la retina. Esta retina artificial genera, en tiempo real, unas señales de salida que son una réplica de las que se producen en la retina humana. Nuestro éxito nos ha demostrado que esta iniciativa no sólo es capaz de esclarecer la naturaleza del cálculo biológico, sino que sirve también para demostrar que los principios del procesado neural de la información ofrecen un nuevo paradigma técnico de extraordinaria potencia.

MISHA A. MAHOWALD y CARVER MEAD trabajan en circuitos analógicos a gran escala en el Instituto de Tecnología de California. Mahowald diseña sistemas de visión que remedan la organización nerviosa. Mead es profesor de informática y figura destacada en el campo del desarrollo de métodos de diseño de circuitos integrados a gran escala. Trabaja ahora en la creación de modelos de silicio de la cóclea, la retina y otras estructuras corporales.

Los sistemas de procesado de imágenes por medios electrónicos habituales no guardan especial parecido con la retina humana. Suelen estar constituidos por un dispositivo fotosensible que emite señales proporcionales al valor absoluto de la iluminación en cada punto de la imagen, respaldado por un potente ordenador que intenta extraer las características geométricas del objeto a partir de los datos digitales resultantes.

La retina presenta cinco capas de células. A través de ellas fluye la información en un sentido vertical (de cada una de las capas a la siguiente) y en sentido horizontal (entre las células vecinas de una misma capa). La detección de los fotones y el procesamiento de toda la información que éstos contienen se combinan de forma muy compleja. Creemos que esta arquitectura es crucial para la formación de imágenes visuales.

Las tres capas superiores de la retina (fotorreceptores, células horizontales y células bipolares) son las que mejor se conocen. Se trata, también, de las capas externas que hemos simulado en la retina de silicio.

La primera capa consta de conos y bastones, que convierten la luz incidente en señales eléctricas. Las células horizontales —la segunda capa— establecen conexiones con fotorreceptores y células bipolares a través de la sinapsis triádica. Cada célula horizontal se conecta con sus vecinas a través de las llamadas uniones de intervalo, por las que se difunden los iones. En razón de esa configuración, el potencial de una célula horizontal viene determinado por el valor medio ponderado espacialmente de los potenciales de las células que la rodean. La mayor contribución corresponde a las células inmediatas; las más distantes contribuyen relativamente menos.

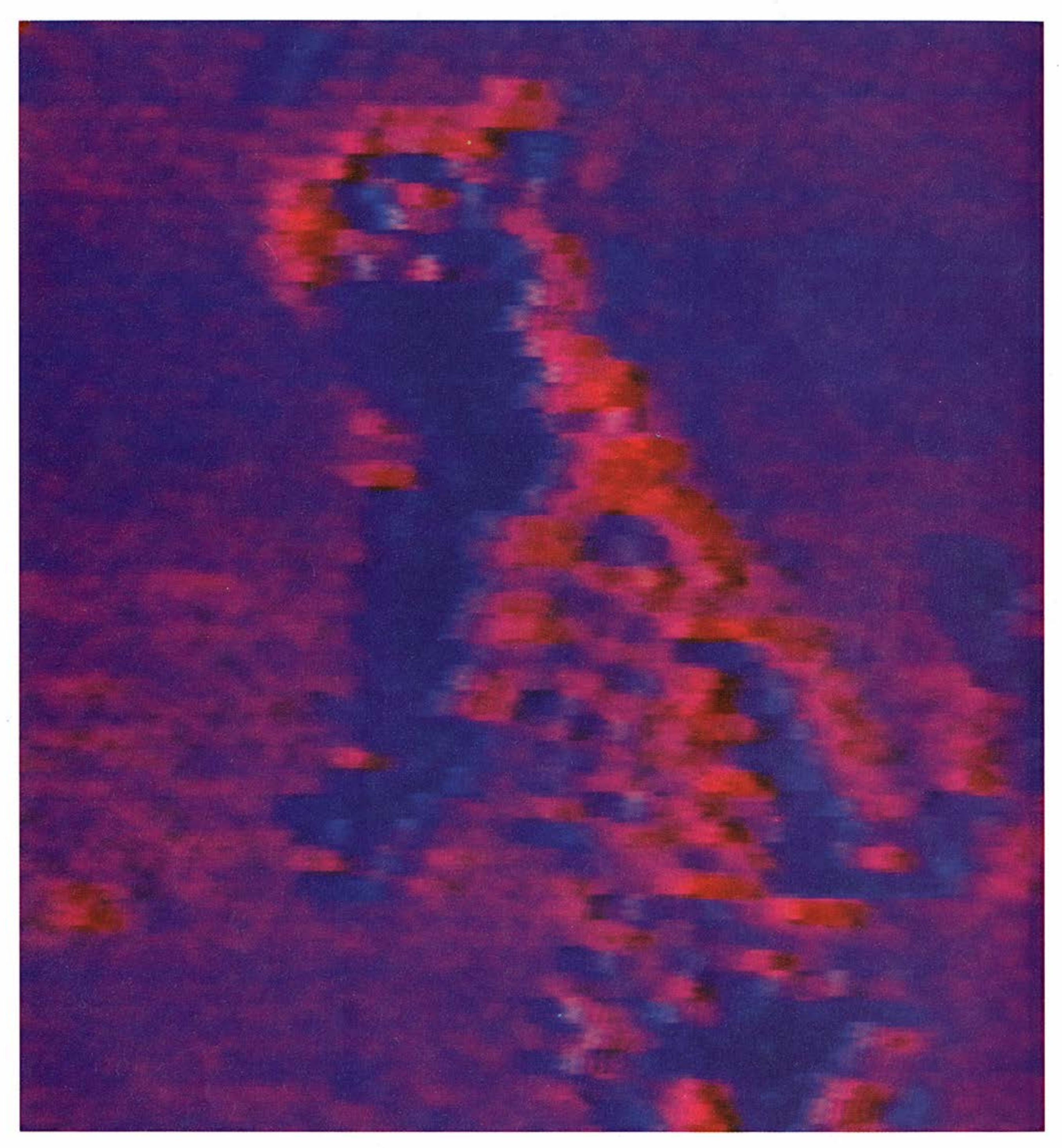
Cada célula bipolar recibe sendas señales de entrada procedentes de un fotorreceptor y de una célula horizontal y emite una señal que es proporcional a la diferencia entre estas dos. La información procedente de la célula bipolar atraviesa la capa celular amacrina, llega hasta los ganglios celulares y, finalmente, se transmite hasta el nervio óptico.

La misión principal que cumplen esas tres capas es la de adaptación. Los fotorreceptores, las células horizontales y las células bipolares reciben una cantidad muy variable de la luz incidente y adaptan su respuesta para producir una señal con un intervalo dinámico mucho más estrecho que, sin embargo, capta toda la información a destacar en un cuadro determinado. La adaptación es necesaria para que el sistema pueda responder con sensibilidad a los pequeños cambios locales de la imagen en relación con un fondo cuya intensidad puede variar en un factor del orden de un millón entre el mediodía y la noche.

La retina cubre este enorme intervalo mediante una serie de etapas diferentes. La primera de las respuestas biológicas se basa en la utilización de dos tipos de receptores diferentes: los bastones son sensibles a los niveles lu-

minosos de baja intensidad y los conos a los niveles luminosos de intensidad más alta. Por otra parte, los conos están facultados para alterar el intervalo de las intensidades luminosas a las que responden, según el brillo medio a largo plazo de la escena percibida. (Estos mecanismos de adaptación explican por qué, cuando una persona pasa de una zona de sol intenso a otra de semioscuridad, ve desaparecer las imágenes como si hubieran sido obtenidas en condiciones de sobreexposición.)

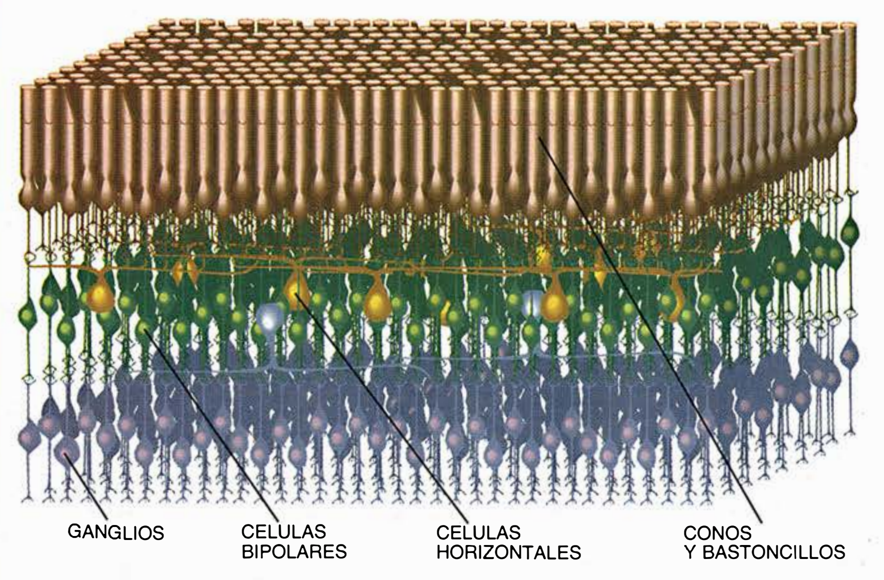
Las células bipolares cuentan con un intervalo dinámico más estrecho que los de conos y bastones. El elemento principal para reforzar su respuesta en relación con los aspectos principales de una imagen es la sinapsis triádica. La sinapsis triádica media la retroalimentación entre las células horizontales y los conos. En virtud de ello, las células bipolares no tienen que responder al brillo absoluto de una escena; responden sólo a la diferencia entre la señal procedente del



1. ASI VE UNA RETINA DE SILICIO un gato en movimiento. Quedan con ello patentes las etapas iniciales del procesamiento de imágenes biológico. (Las zonas de la imagen que son más oscuras que sus alrededores aparecen de color azul; las que son más claras, de color rojo.) La retina responde con mayor fuerza a las imágenes en movimiento: la cabeza del gato y las patas delanteras sobresalen con un relieve más acusado, mientras que las partes del cuerpo que se encuentran en reposo se confunden con el fondo. (Fotografía de Jessie Simmons.)

Modelo de estructuras neuronales en silicio

RETINA HUMANA

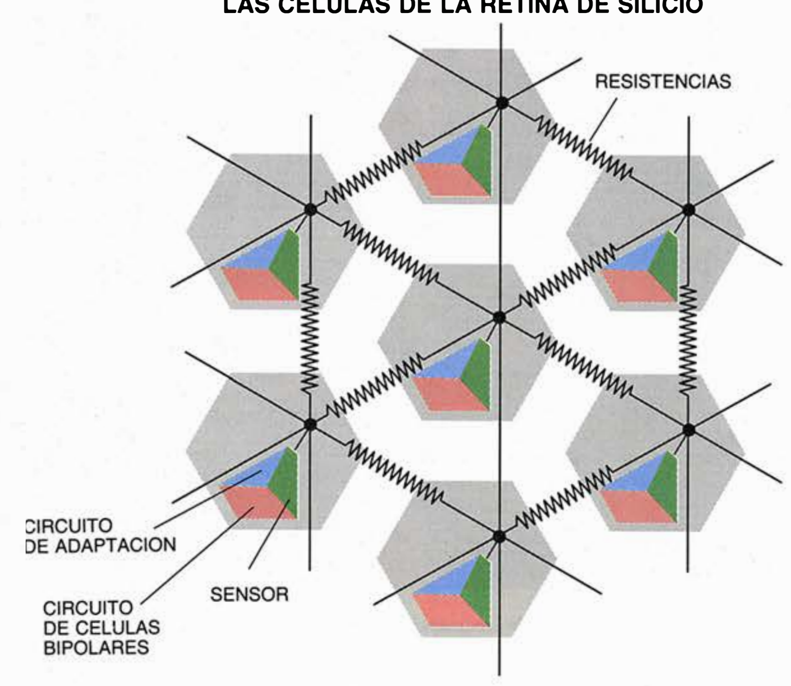


La retina humana consta de células que conducen las señales nerviosas de una capa a otra y por el interior de cada capa. La retina de silicio reproduce las funciones de las tres capas exteriores de la retina humana: los fotorreceptores (conos y bastones), las células horizontales y las células bipolares. Los conos y bastones transforman la luz en señales eléctricas; las células horizontales responden a la intensidad luminosa media existente en su proximidad; las bipolares transmiten una señal que corresponde a la relación entre las señales de los bastones y las células horizontales a través de las células ganglionares.

RETINA DE SILICIO



CONEXIONES ENTRE LAS CELULAS DE LA RETINA DE SILICIO



Los fotorreceptores de silicio imitan la función de los conos de la retina. Cada uno consta de un fotosensor y un circuito de adaptación que ajusta su respuesta a los niveles luminosos variables. Una red de resistencias variables simula la capa de células horizontales y proporciona una respuesta basada en la cantidad media de energía luminosa que incide sobre los fotorreceptores más próximos. Los circuitos de las células bipolares amplifican la diferencia existente entre la señal procedente del fotorreceptor y el valor medio local. Todos los circuitos que se integran en la pastilla se disponen en bloques superpuestos. Las zonas de silicio contaminado con impurezas (*verde*) son las bases de los transistores y de los fotosensores; el polisilicio (*rojo*) constituye los cables y los resistores; las líneas metálicas (*azul*) actúan como conductores de baja resistencia. El diagrama (*izquierda*) muestra la disposición del circuito del receptor y la red hexagonal de resistores variables que forma la red de células horizontales.

fotorreceptor y la señal media local, tal como viene calculada por la red de células horizontales.

Las señales emitidas por fotorreceptores y células horizontales son de tipo logarítmico; por tanto, la señal de salida de las células bipolares —diferencia entre ambas— corresponderá al cociente entre la intensidad de luz local y la intensidad del fondo, cualquiera que sea el valor absoluto del nivel luminoso. El procesamiento posterior de esa información en función del cociente entre intensidades permite que la retina perciba con detalle lo mismo las zonas claras que las oscuras encerradas en una misma escena.

La adaptación local no se limita a asegurar la obtención de señales adecuadas para cambios pequeños del brillo de las imágenes; suprime también los elementos irrelevantes y refuerza los pertinentes. Las zonas grandes y uniformes producen sólo señales visuales débiles, porque los impulsos procedentes de un determinado fotorreceptor quedan cancelados por la señal promediada espacialmente que procede de la red de células horizontales. El perfil de los objetos produce señales intensas porque los receptores situados a ambos lados del perfil reciben niveles de luz que difieren notablemente del promedio local.

La respuesta temporal, relativamente lenta, de la red de células horizontales refuerza la respuesta del sistema óptico a las imágenes en movimiento. Las señales de las imágenes de los objetos en movimiento que producen los fotorreceptores se obtienen en un tiempo en que las señales producidas por las células horizontales (con las que tienen que compararse) corresponden todavía a un nivel de intensidad anterior. Al contrario de lo que sucede en una cámara fotográfica, que produce una sola instantánea de una imagen, buena parte del trabajo de la retina se dedica a registrar cambios.

A mediados de la década de los ochenta, los neurocientíficos sabían ya lo suficiente sobre el modo de operar de las neurona: su funcionamiento no encerraba ningún misterio. Desde el punto de vista de un diseñador de sistemas, no había ninguna misión cumplida por un elemento neuronal que no pudiera repetirse con dispositivos electrónicos. Nuestro objetivo al construir una retina de silicio no planteaba en absoluto una reproducción biológica de este órgano en sus últimos detalles, sino la creación de una versión simplificada del mismo que contuviera la estructura mínima necesaria para remedar el funcionamiento biológico.

Cada píxel de nuestro modelo de retina consta de tres partes: un fotoreceptor, una serie de conexiones de células horizontales y una célula bipolar. El fotorreceptor comprende un elemento fotosensible y un bucle de retroalimentación que imita el mecanismo lento de adaptación de los conos en la retina biológica. El fotosensor consiste en un transistor bipolar que produce una corriente proporcional al número de fotones que absorbe. El bucle de retroalimentación amplía la diferencia existente entre la fotocorriente instantánea y su nivel medio a largo plazo. El voltaje de salida de este circuito es proporcional al logaritmo de la intensidad luminosa.

En el clímax de su sensibilidad, el fotorreceptor puede formar imágenes con flujos luminosos del orden de 100.000 fotones por segundo, un valor que correspondería a la intensidad de la luz existente en un paisaje bañado por la luz de la luna, enfocada sobre el microcircuito con la ayuda de la lente de una cámara fotográfica ordinaria. (Este valor se halla también próximo al límite operativo de los conos de la retina en los vertebrados.) Los cambios de intensidad elevados saturan la respuesta del fotorreceptor hasta que éste se adapta al nuevo nivel luminoso.

Para imitar las células horizontales, construimos una red hexagonal sencilla de resistencias y condensadores. Cada vértice de la red se conecta a un determinado fotorreceptor y, a través de resistencias idénticas variables, a los seis vértices más próximos. Los condensadores corresponden a la capacidad de almacenamiento de cargas de las membranas celulares horizontales, cuyas finas ramificaciones presentan una gran superficie para almacenar las cargas iónicas procedentes del fluido extracelular. Por su parte, las resistencias constituyen una réplica de las uniones de intervalo que emparejan células horizontales adyacentes en la retina de los vertebrados.

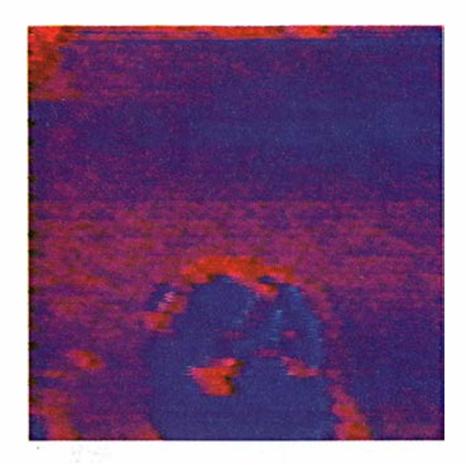
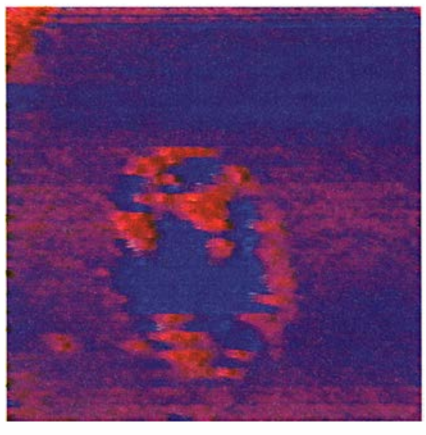
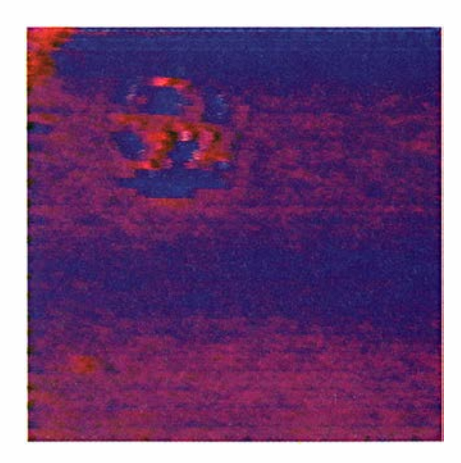








2. RETRATO DE LINCOLN (*arriba*) y su difuminación gradual conforme la retina de silicio se va adaptando a una imagen inmóvil. Cuando la retina se ha adaptado a esta imagen evanescente, la sustitución de una hoja de papel en blanco produce una imagen residual en negativo, de forma análoga a lo que sucede cuando el sistema visual humano percibe estas imágenes residuales al dejar de mirar una escena con objetos muy brillantes. La banda luminosa que recorta la cabeza de Lincoln en la primera imagen se produce como consecuencia de que la retina de silicio refuerza el contraste de los límites entre zonas claras y oscuras.

3. IMAGENES DE UN BALON EN MOVIMIENTO para mostrar de qué modo la respuesta retardada de la red celular horizontal afecta a la percepción de la retina del hombre. El balón deja tras de sí una cola o estela de excitación, con zonas brillantes en los lugares por los que han pasado las partes oscuras del mismo y con zonas oscuras en los lugares por los que han pasado las partes claras.

El voltaje, en cada vértice de la red celular horizontal, presenta, pues, un valor medio espacialmente ponderado de las señales de entrada de los fotorreceptores a la red. Variando los valores de estas resistencias, podemos modular la superficie efectiva sobre la que se promedian tales señales: a mayor resistencia, se necesitará menos superficie sobre la que se distribuyan las señales. Las células horizontales sirven también para alimentar a los fotorreceptores y reducir su respuesta en zonas de intensidad uniforme.

La señal de salida final de cada píxel de la retina de silicio procede de un amplificador que detecta la diferencia de potencial que existe entre la salida de una unidad de fotorreceptor y el vértice correspondiente de la red de células horizontales. El amplificador se asemeja, en su comportamiento, a las células bipolares de los vertebrados.

El resultado es una pastilla de semiconductor ("chip") que contiene unos 2500 píxeles (los fotorreceptores y los circuitos de procesado de imágenes asociados con ellos), dispuestos en forma de una matriz de 50 por 50. Esta pastilla retiniana incorpora, además, todas las conexiones por cable y circuitos amplificadores que nos permiten estudiar las señales de salida de cada píxel o proceder a un barrido de las salidas de todos los píxeles y llevarlas hasta un monitor de televisión, que muestra así globalmente la imagen procesada por todo el sistema. (El proceso de diseño y construcción de esta retina de silicio ha requerido 20 ensayos diferentes, cada uno de los cuales ha costado varios meses de trabajo. La investigación continúa para crear nuevos diseños, específicos para determinadas tareas, y comprobar las hipótesis relacionadas con el proceso de formación de imágenes.)

El comportamiento de esta retina artificial adaptativa muestra un estrecho parecido con el de los sistemas biológicos. Comenzamos por examinar la forma en que las señales de salida de los píxeles responden a los cambios de la intensidad luminosa cuando las células que los rodean se encuentran sometidas a una iluminación de fondo constante. La forma de la curva de respuesta es similar a la de las células bipolares de la retina de los vertebrados. Los cambios de la iluminación de fondo modifican el potencial de la red de células horizontales; y así, la curva de respuesta de la retina de silicio se desplaza de la misma manera en que lo hacen las retinas biológicas.

La respuesta temporal de la retina de silicio se parece también mucho a la de las células bipolares. Cuando la intensidad de la luz aumenta de repente, existe un gran salto en el voltaje de salida, igual a la diferencia que se aprecia entre la nueva señal de entrada y el voltaje medio almacenado previamente en la red de resistencias. La respuesta disminuye hasta alcanzar un valor estable, para el que la red calcula un nuevo voltaje medio. Cuando la luz disminuye bruscamente hasta alcanzar su intensidad original, el voltaje de salida adquiere un valor inferior al original, dado que la red posee ahora un potencial medio mayor que el que tenía. Cuando la red vuelve a recuperar el valor medio original, la salida torna también a su estado del principio. En una retina biológica, la respuesta lenta de las células horizontales asegura que los cambios bruscos de la intensidad —que podrían corresponder, por ejemplo, a la sombra de un predador pasando sobre un animal— atraviesen las células bipolares sin sufrir ninguna atenuación.

En las pruebas subsiguientes, encontramos que nuestra retina de silicio estaba sujeta a muchas de las mismas ilusiones ópticas que perciben los humanos. Recordemos una de las más conocidas, la del contraste simultáneo: un cuadrado gris parece ser más oscuro cuando se coloca sobre un fondo blanco que cuando se coloca sobre un fondo negro. Otras ilusiones ópticas se refieren a las bandas de Mach (bandas aparentes claras y oscuras adyacentes a transiciones de la oscuridad a la luz) y a la red de Herring, en la que aparecen unos puntos grises en la intersección de una red de líneas blancas.

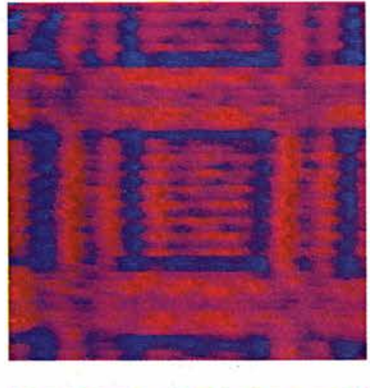
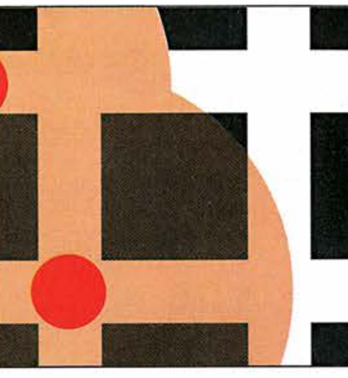
Todas estas ilusiones ópticas aportan datos de interés sobre el papel de la retina biológica en la reducción de la anchura de banda de la información visual para extraer los rasgos esenciales de una imagen determinada. Las ilusiones se producen en virtud de la codificación selectiva, por parte de la retina, de la información visual que recibe. El hecho de que nuestro modelo de retina proporcione en ocasiones ilusiones ópticas nos confirma en nuestra interpretación de los principios según los cuales opera la retina biológica.

El comportamiento de la retina artificial demuestra el poderío del paradigma de cálculo analógico en que se basan los circuitos nerviosos. El paradigma digital que domina la computación supone que la información debe digitalizarse para reducir al máximo el nivel de ruido y la degradación. En un dispositivo digital, los voltajes situados dentro de cierto intervalo se transforman en bits con un valor de uno, por ejemplo, mientras que los voltajes situados en un inter-

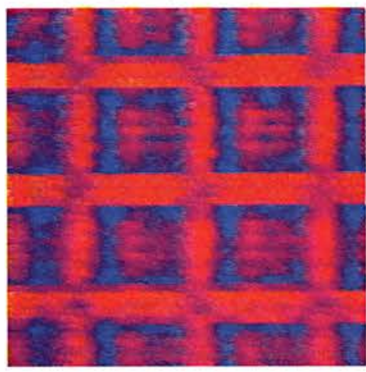
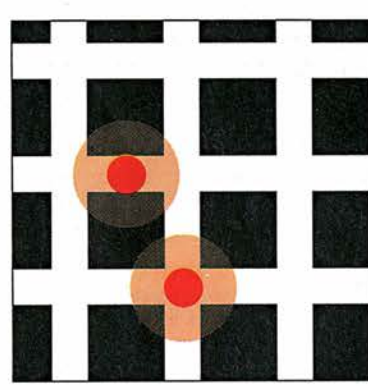
Ilusiones ópticas y retina de silicio

Si el comportamiento de la retina de silicio sufre percepciones erróneas propias del sistema visual, es legítimo pensar que domina principios biológicos esenciales. La parrilla de Herring es una ilusión óptica que se caracteriza por la aparición de manchas grises en las intersecciones de un reticulado de cuadrados negros sobre un fondo blanco. Estas manchas se producen como consecuencia de que la respuesta de la retina en un punto dado del campo visual depende de la intensidad de la luz en los puntos próximos. Porque las zonas de las intersecciones contienen más espacio blanco, se reduce el brillo aparente de la propia intersección. Ocurre así en la ilusión óptica de contraste simultáneo (*abajo*), en la que un cuadrado gris aparece más oscuro o más claro según el brillo del fondo sobre el que destaca.

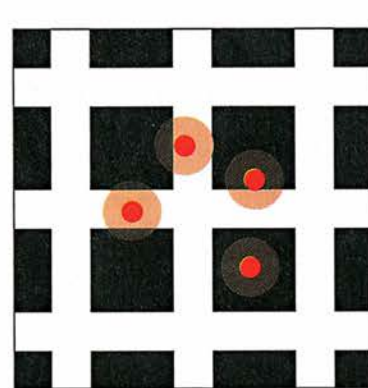
La ampliación de la red o parrilla pone de manifiesto que no se produce ningún cambio ilusorio en el brillo: tanto el centro como los alrededores del campo de recepción son menores que el espacio existente entre los cuadrados.

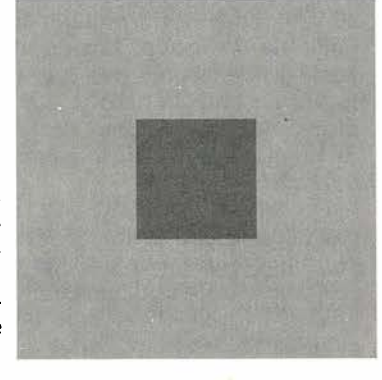
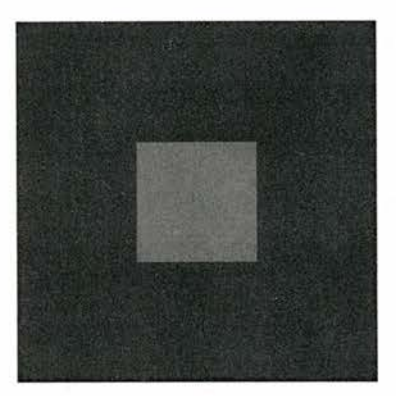
Cuando el tamaño del centro de recepción es comparable al espacio existente entre los cuadrados, se produce la ilusión óptica.

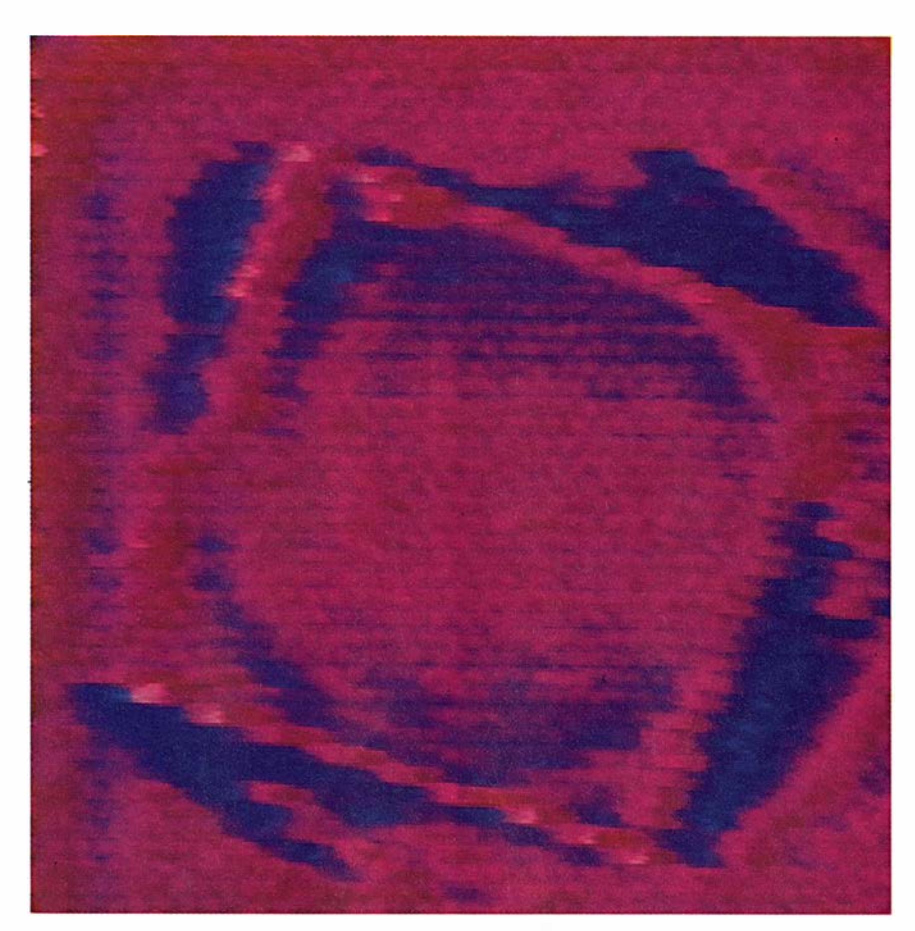



La ilusión desaparece de nuevo cuando el reticulado se ve desde cierta distancia: la intensidad media correspondiente a los alrededores es casi la misma en todas las zonas.

Los cuadrados pequeños que existen en estas dos figuras tienen la misma tonalidad de gris. Sin embargo, dado que la retina percibe el brillo de un objeto relacionándolo con el fondo en que se encuentra dicho objeto, el cuadrado de la derecha nos parece más claro.



4. UN CUADRADO EN ROTACION produce una cola de píxeles oscuros (*color azul*) a medida que va girando. Este efecto síguese de la disminución lenta del voltaje en la red de células horizontales de la retina; el cuadrado brillante aumenta el potencial de esta red de células y provoca que los píxeles del fondo aparezcan más oscuros en términos relativos. Entretanto, la zona circular del centro del cuadrado se muestra del mismo color que el fondo, dado que su intensidad no cambia con el tiempo y, por consiguiente, la retina se adapta a ella.

valo diferente se convierten en ceros. Todos los dispositivos que están situados a lo largo del camino de cálculo recuperan los valores de sus voltajes, retornando a sus valores correctos. La digitalización impone precisión sobre sistemas físicos que, por naturaleza, son imprecisos.

Por el contrario, las neuronas son dispositivos analógicos: sus cálculos están basados en corrientes de iones variables de forma continua y no en bits que representan valores discretos de ceros y unos. A pesar de ello, los sistemas neuronales son procesadores de información altamente eficientes. Ello se explica por el trabajo de los sistemas nerviosos, que se basan en la física fundamental y no intentan oponerse a ella.

Aunque la naturaleza no sabe nada de bits, del álgebra de Boole o de la teoría de sistemas lineales, muchos fenómenos físicos cumplen importantes funciones matemáticas. Por ejemplo, el principio de conservación de la carga determina que las corrientes eléctricas se sumen o resten. Las propiedades termodinámicas de los iones dan lugar a que las corrientes que fluyen hacia el interior de una célula sean una función exponencial de la diferencia de potencial que existe a ambos lados de su membrana.

La física ayuda a explicar por qué los circuitos integrados digitales más eficientes que se puedan imaginar consumirán del orden de 10^{-9} joules por cada operación, mientras las neuronas sólo consumen 10^{-16} joules. En los sistemas digitales, las operaciones con datos y los cálculos deben llevarse a cabo convirtiéndolos en un código binario, un proceso que requiere unos 10.000 cambios de voltaje digitales por cada operación. Los dispositivos analógicos ejecutan esta misma operación en un solo paso y, por tanto, disminuyen el consumo de potencia de los circuitos de silicio en un factor del orden de 10.000.

De mayor trascendencia resulta que la capacidad de los circuitos neurales analógicos para trabajar en medios impredecibles dependa de su habilidad para representar la información en su conjunto. Estos circuitos responden a las diferencias existentes en la amplitud de las señales, y no a sus valores absolutos; eliminan así, en buena parte, la necesidad de proceder a operaciones de calibrado muy precisas. El contexto para una señal neurológica puede ser la intensidad luminosa media local, como sucede cuando la señal del fotorreceptor se compara con la señal procedente de una red de células horizontales en la sinapsis triádica. Puede tratarse también del comportamiento previo del propio circuito neuronal, como ocurre en el proceso de adaptación a largo plazo de un fotorreceptor ante los cambios de nivel luminoso. El contexto de una señal puede estar formado también por un conjunto algo más complejo de pautas nerviosas, incluidas todas las que constituyen los procesos de aprendizaje.

La interrelación existente entre el contexto y la adaptación es un principio fundamental del paradigma neuronal. Este principio condiciona los circuitos inspirados en la neurología. Dado que la información se basa siempre en cambios y diferencias, los cambios constantes son una necesidad para los sistemas neuronales y no una fuente de dificultades, como sucede en los sistemas digitales. Por ejemplo, cuando se muestra una imagen a una retina digital, es necesario que la mantengamos siempre en movimiento; en caso contrario, la retina se adaptará a ella y dejará de percibirla. Esta exigencia de cambios sitúa firmemente a los circuitos neuronales en el mundo que observan, en contraste con los circuitos digitales, cuyo diseño parte de la separación entre el sistema y el mundo exterior.

Hemos andado ya los primeros pasos en la simulación de los cálculos que realiza el cerebro para procesar una imagen visual. ¿Cómo generalizar esa misma estrategia a otros tipos de cálculos cerebrales? A primera vista, puede parecer que la naturaleza básicamente bidimensional de los circuitos integrados actuales constituya un freno limitante de nuestro esfuerzo por modelizar el tejido nervioso. Ahora bien, muchas partes del sistema nervioso central están constituidas por láminas delgadas que soportan representaciones bidimensionales de toda la información relevante a efectos de los cálculos. La retina es sencillamente el ejemplo más obvio de esta disposición. Y, lo mismo en el sistema nervioso que en el de silicio, los dispositivos activos —sean sinapsis o transistores— ocupan no más allá del 1 o 2 por ciento del espacio; los "cables" de conexión ocupan la superficie restante. En consecuencia, podemos asegurar que la limitación que representan las cone-

xiones ha forzado el diseño de muchas de las partes del cerebro hasta proporcionarle una configuración peculiar.

Las formas de conexión especializadas constituyen una adaptación evidente a las situaciones en que el número de elementos de procesamiento viene limitado por la cantidad total de cable de conexión que se necesita para acometer una operación de cálculo. Por ejemplo, las conexiones cerebrales se disponen de forma tal que permitan asegurar que toda la información que está estrechamente relacionada se almacena en grupos de neuronas que se encuentran muy próximas entre sí. En particular, las zonas corticales que llevan a cabo las primeras fases del procesamiento de las informaciones visuales mantienen constantes las relaciones espaciales de la imagen. Esta forma cartográfica de organización de la corteza cerebral posibilita que la mayoría de las conexiones del cerebro sean de corta longitud y muy ramificadas. Siguiendo esta misma disposición, en nuestra retina de silicio las resistencias de la red celular horizontal realizaban los cálculos para todo el circuito y no sólo los correspondientes a las células adyacentes más inmediatas.

El desarrollo futuro de la retina de silicio y otros microcircuitos, similares a éste e inspirados también en las neuronas, discurrirá por dos caminos potencialmente divergentes. Consiste el primero en la creación de una máquina de visión mejorada. Al fin y al cabo, una pastilla ("chip") que aloje un conjunto de circuitos analógicos, más o menos sencillos, puede realizar las mismas funciones que un sistema de muchas pastillas que contenga un sensor de imágenes, muchos microprocesadores potentes y pastillas con gran capacidad de memoria. Algo se ha hecho en este sentido; me refiero al diseño de circuitos binoculares, formados por la asociación de dos retinas de silicio, con el fin de determinar la distancia entre dos objetos de una misma escena.

La visión real (o algo que se le aproxime) exigirá probablemente la utilización de microcircuitos de retina que centupliquen el número de píxeles de los actuales, amén de otros circuitos capacitados para reproducir, de la mejor manera posible, el trabajo de las funciones que son sensibles al movimiento y que refuerzan los perfiles de las imágenes. En última instancia, estos sistemas deberán incorporar también ciertos circuitos nerviosos que reconozcan las imágenes producidas por la retina.

El otro camino conducirá hacia un objetivo todavía más ambicioso: la comprensión del cerebro. Durante años, los biólogos han dado por supuesto que el funcionamiento del cerebro se entendería del todo cuando se supiera de qué modo operan todas las moléculas integrantes de una membrana nerviosa. Pero el modelo del cálculo digital y el del cálculo analógico han demostrado la falsedad de esa suposición. Después de todo, los ordenadores se construyen partiendo de un sistema de dispositivos perfectamente establecido cuyo funcionamiento se conoce en sus más mínimos detalles. Lo que no empece que, muchísimas veces, sea imposible demostrar que un simple programa de ordenador calculará cierto resultado o incluso si el correspondiente cálculo llegará a su fin.

Dejando al margen la perfección que se alcance en la reproducción de esa arquitectura del cerebro, este diseño, por sí solo, no nos proporcionará una visión global de los principios y representaciones que rigen la organización del sistema nervioso. Las interacciones entre los cálculos correspondientes son demasiado complejas. No obstante, si los investigadores son capaces de fabricar sistemas de silicio que reproduzcan adecuadamente un sistema biológico, pueden contribuir a hacer progresar nuestros conocimientos actuales del sistema nervioso.

El éxito de esta aventura puede tender un puente entre la neurobiología y las ciencias de la información, amén de permitir un conocimiento más hondo del cálculo como proceso físico. Todos estos planteamientos fructificarán en una visión totalmente nueva del procesamiento de la información que canalice la potencia de los sistemas analógicos colectivos para resolver problemas que son inabordables con los métodos digitales al uso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE RETINA: AN APPROACHABLE PART OF THE BRAIN. John E. Dowling. Belknap Press of Harvard University Press, 1987.

ADAPTIVE RETINA. Carver Mead y Mohammed Ismail. Kluwer Academic Publishers, 1989.

AN ELECTRONIC PHOTORECEPTOR SENSITIVE TO SMALL CHANGES IN INTENSITY. T. Delbrück y C. A. Mead en *Advances in Neural Information Processing Systems I*. Dirigido por David Touretzky. Morgan Kaufmann Publishers, 1989.

SILICON RETINA. M. A. Mahowald y Carver Mead en *Analog VLSI and Neural Systems*. Dirigido por Carver Mead. Addison-Wesley, 1989.

Formación de los yacimientos minerales

Antes de que los metales puedan beneficiarse, deben atravesar varios procesos. El agua, el magma y otros fluidos, así como los fenómenos atmosféricos, intervienen en la formación de las menas

George Brimhall

Cuando unas 80.000 personas tomaron, a mediados del siglo XIX, la ruta del oeste en busca de oro, muchas sabían dónde cerner. Los mineros llegados entonces a California explotaron la grava en los lechos de los ríos modernos y lavaron los antiguos yacimientos fluviales en canalones por donde corrían chorros de agua aprovechando las escarpadas orillas. Cuando se agotaron estos enormes yacimientos, los buscadores siguieron la pista del oro río arriba hasta su origen: el Filón Madre, una formación geológica de vetas de cuarzo blanco que contenía oro en una longitud de 240 kilómetros y, en algunas zonas, con más de 1500 metros de profundidad.

Pero los buscadores ignoraban cómo se había introducido el oro en las vetas, por qué se encontraba al lado del cuarzo o cuál era la razón de la existencia del Filón Madre. Sólo recientemente han comenzado los científicos a comprender los procesos de formación del oro y otras menas, es decir, minerales o rocas que contienen elementos aprovechables: plata, hierro, cobre o estaño, entre otros. También han descubierto dónde se originan. Las menas, sabemos ya, constituyen parte integrante del proceso de formación del planeta, de su evolución dinámica y de las actividades que configuran su superficie.

Así como los arroyos y los ríos de California transportaron pepitas y láminas de oro desde las vetas hasta los lechos de los cursos fluviales, así también fluidos diversos, supra e infrayacentes a la superficie de la Tierra, transportan otros elementos que constituyen las menas. Estos fluidos y sus recorridos, junto con los procesos que dan forma a la corteza terrestre, encierran la clave del proceso creador de menas metálicas. Rastreando los fluidos y sistemas tectónicos que han cambiado la Tierra a lo largo del tiempo, los investigadores han desentrañado la génesis de estos valiosos yacimientos.

La formación de menas y su emplazamiento cerca de la superficie terrestre son el resultado de mucho más que un simple cambio geológico. Sólo una serie precisa de acontecimientos físicos y químicos, que tienen lugar en unas condiciones de entorno adecuadas y con una secuencia correcta y a los que siguen ciertas condiciones climáticas, pueden originar una concentración alta de estos compuestos fundamentales para el desarrollo de la civilización y la tecnología.

No es tarea fácil seguir la pista de los metales descifrando los cambios de la superficie terrestre. Pero la naturaleza ha venido en nuestro auxilio al simplificar un aspecto de esta búsqueda: la cantidad total de metal en la Tierra ha permanecido constante a lo largo de los tiempos. Si dejamos de lado algunas excepciones, como el plomo, que se forma parcialmente por desintegración radiactiva del uranio y del torio, los metales que se encuentran en los yacimientos minerales y en las rocas en todo el mundo han permanecido dentro de la Tierra a lo largo de toda su historia de 4600 millones de años.

Esta cantidad invariante de metales en menas se distribuye en dos geosferas, o sistemas fisicoquímicos. La geosfera más externa es una capa delgada y extremadamente reactiva, cercana a la superficie terrestre. En ella están incluidas la atmósfera, la biosfera, la hidrosfera, la litosfera y la astenosfera, en la que se mueven las placas continentales y oceánicas. Por

GEORGE BRIMHALL enseña geología en la Universidad de California en Berkeley. Terminados sus estudios en ese mismo centro en 1972, empezó a trabajar con la compañía Anaconda, en investigación y exploración minera. Más tarde lo contrató la Universidad Johns Hopkins, de donde pasó a Berkeley. Se halla concentrado ahora en la integración de los mecanismos de transporte de metales con los de la génesis del suelo, hidrología y geomorfología.



1. MINA DE COBRE LA ESCONDIDA en el desierto chileno de Atacama. Constituye una ventana privilegiada para escudriñar las entrañas de la Tierra. La baja tasa de erosión y la aridez de la zona favorecieron el enriquecimiento y la conservación del cobre.

debajo de esta complicada geosfera hay otra, la del manto y el núcleo.

Aunque casi todos los metales son primordiales, es decir, no se han creado ni destruido desde el principio de la Tierra, se han trasladado de un lugar a otro. La redistribución de los elementos, metálicos y no metálicos, se ha producido en virtud de complejas interacciones químicas y térmicas entre las dos geosferas. El desplazamiento de algunos elementos empezó muy pronto, incluso mientras se formaba el planeta, según una teoría, mediante acreción de meteoritos en el sistema solar inicial.

La prototierra comenzó con una composición semejante a la de un meteorito primitivo. Partidarios de esa concepción son Brian H. Mason, del Museo Nacional de Historia Natural de los Estados Unidos en Washington, y Alfred E. Ringwood, de la Universidad Nacional de Australia en Canberra. Los meteoritos se iban agregando, al comienzo, poco a poco, pero el ritmo se aceleró extraordinariamente al crecer el tamaño de la Tierra y aumentar su atracción gravitacional. Debido a ello, la masa meteórica primitiva se reestructuró completamente y la Tierra se diferenció en capas concéntricas discontinuas.

Cada capa está compuesta de metales distintos. Las gotículas de hierro que se separaban del manto, se hundían y se fundían para formar el núcleo metálico como lo hicieron otros elementos siderofílicos, o con afinidad por los metales: níquel, cobalto, oro y platino. Los elementos concentrados en el manto son, por contra, litofílicos, o con afinidad por las rocas: silicio, magnesio, aluminio y calcio. Cada uno de ellos se combina con el oxígeno, el elemento más común en las rocas, para formar silicatos en el manto y la corteza. Los elementos que prevalecen después de los elementos litofílicos, que constituyen la parte principal de la corteza, son los que forman las menas: principalmente metales calcófilos, o con afinidad por el azufre, como cobre y cinc, junto con elementos volátiles, como cloro y azufre.

Los elementos de las menas, atrapados durante miles de millones de años en las profundidades de la Tierra, ascienden ocasionalmente hacia la superficie, donde se determina su destino. Los porta el magma, que es fluido y menos denso que el manto. A tenor de las condiciones ambientales o de las sustancias que se encuentran durante la ascensión, estos elementos metálicos se convierten en metales aprovechables o se quedan como rocas estériles.

Por ejemplo, el encuentro con el azufre puede determinar una forma metálica. En presencia de grandes cantidades de azufre, los elementos metálicos precipitan en forma de sulfuros minerales ricos en metales, que se distinguen de los minerales comunes que componen las rocas. Los minerales de sulfuros poseen, en razón de su alto contenido metálico, propiedades físicas insólitas, como su elevada densidad, que facilita su recuperación industrial de las rocas estériles que los rodean. Sin una cantidad suficiente de sulfuros, los metales se unen con los minerales que forman las rocas sólo en concentraciones con magnitud de traza, partes por millón o incluso menos. Esa proporción, bajísima, no hace rentable su explotación. En las rocas comunes hay metales así dispersos y desechables.

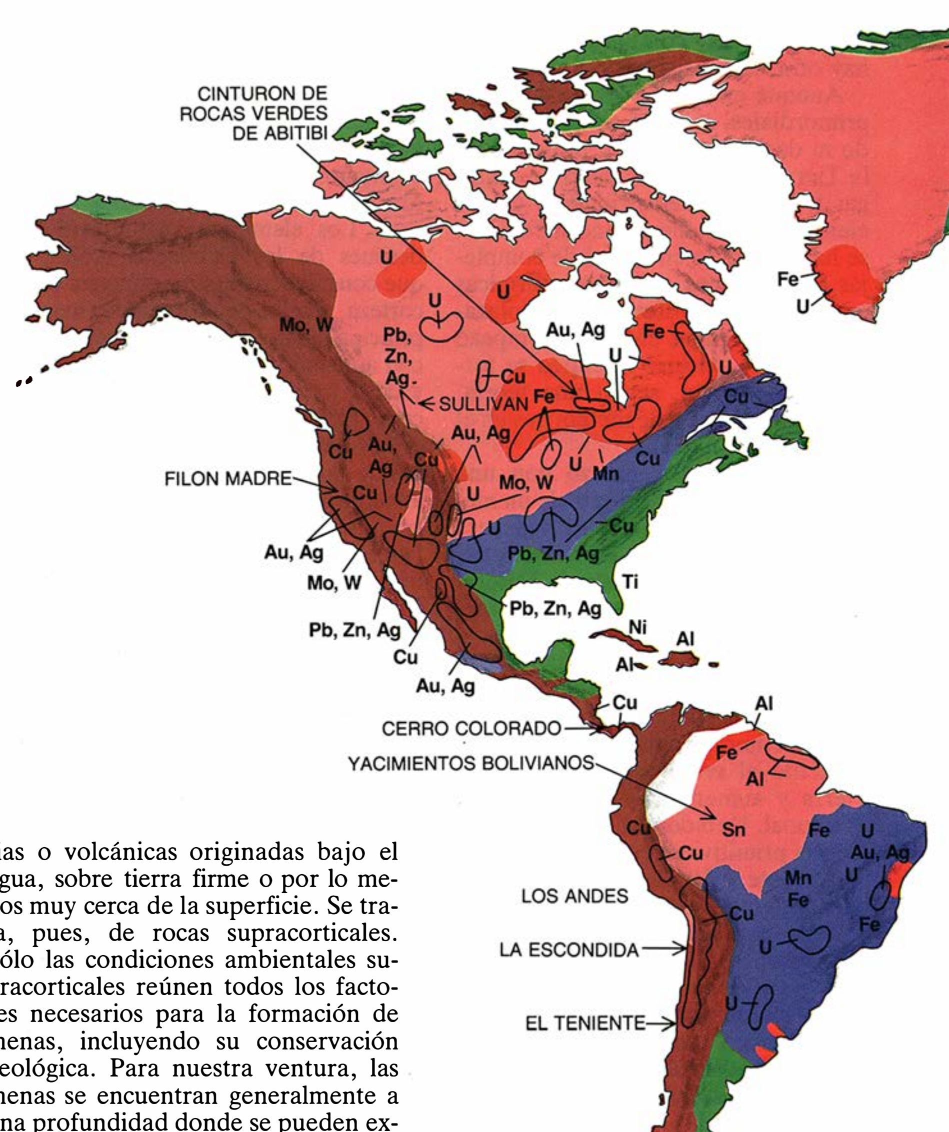
El conocimiento que tenemos de los procesos físicos, químicos y mineralógicos, que producen la concentración de las menas, procede, en buena medida, de las explotaciones mineras. Las minas, a cielo abierto y subterráneas, son laboratorios naturales de valor científico inapreciable en los que se puede interpretar la historia geoquímica. Otra fuente de saber reside en los miles de agujeros de perforaciones que podrían penetrar en la corteza hasta profundidades de más de 3500 metros. Con la información recogida con el estudio de las minas en todo el mundo, los investigadores, entre los que me incluyo, hemos avanzado en la identificación de los procesos geológicos y geoquímicos que intervienen juntos para crear y mantener las altas concentraciones metálicas de la corteza.

La introducción y redistribución de metales en la corteza precisan de la acción de fuerzas ingentes. La magnitud de esa actividad queda evidenciada, por ejemplo, en la mina chilena de La Escondida, yacimiento de cobre que se formó cuando el magma



ascendió hasta la superficie. El yacimiento contiene 1800 millones de toneladas de mineral que producen 27 millones de toneladas de cobre aprovechable, según James A. Bratt de BHP-Utah International. Esta concentración es 300 veces mayor que la concentración normal de la corteza, cifrada en 55 partes por millón, y tiene un valor superior a los 60.000 millones de dólares.

He demostrado que el proceso de enriquecimiento comenzó durante la historia precoz de la Tierra, con la evolución de la corteza, y culminó con una serie de acontecimientos que acabaron por reunir metales con sulfuros y óxidos. La conservación de esas rocas ricas en metales, formadas cerca de la superficie terrestre, demandaba una protección que las librara de la erosión. En consecuencia he investigado la importancia de las condiciones ambientales en la conservación de la mena. Las cercanías tenían que ser estables durante períodos significativos de tiempo geológico, mientras que la presión de elevación y la erosión apenas si ejercían efecto alguno.



Tal conservación se produce en el caso único de que las menas estén integradas en una corteza longeva. Casi todos los yacimientos minerales que se conocen, incluso los más antiguos, se encuentran en la corteza continental, bien en secuencias de rocas que reflejan la proximidad de ésta durante el período de mineralización o bien en fragmentos de corteza oceánica que se han integrado en la corteza continental.

La corteza oceánica, sin embargo, raramente sobrevive porque el manto se halla en circulación constante, o convección: el magma, que asciende desde debajo de las cordilleras del fondo marino que se separan, entra en erupción y se transmite lateralmente hasta que se hunde por debajo de los continentes en las zonas de subducción. La separación más reciente del fondo marino comenzó hace unos 200 millones de años y produjo la distribución actual de continentes y océanos. Se ha conservado menos del 0,001 por ciento de la corteza oceánica formada durante el curso de esa separación. Esta estimación realizada por Robert G. Coleman, de la Universidad de Stanford, sugiere que el resto de la corteza oceánica se perdió en el manto a través de la subducción.

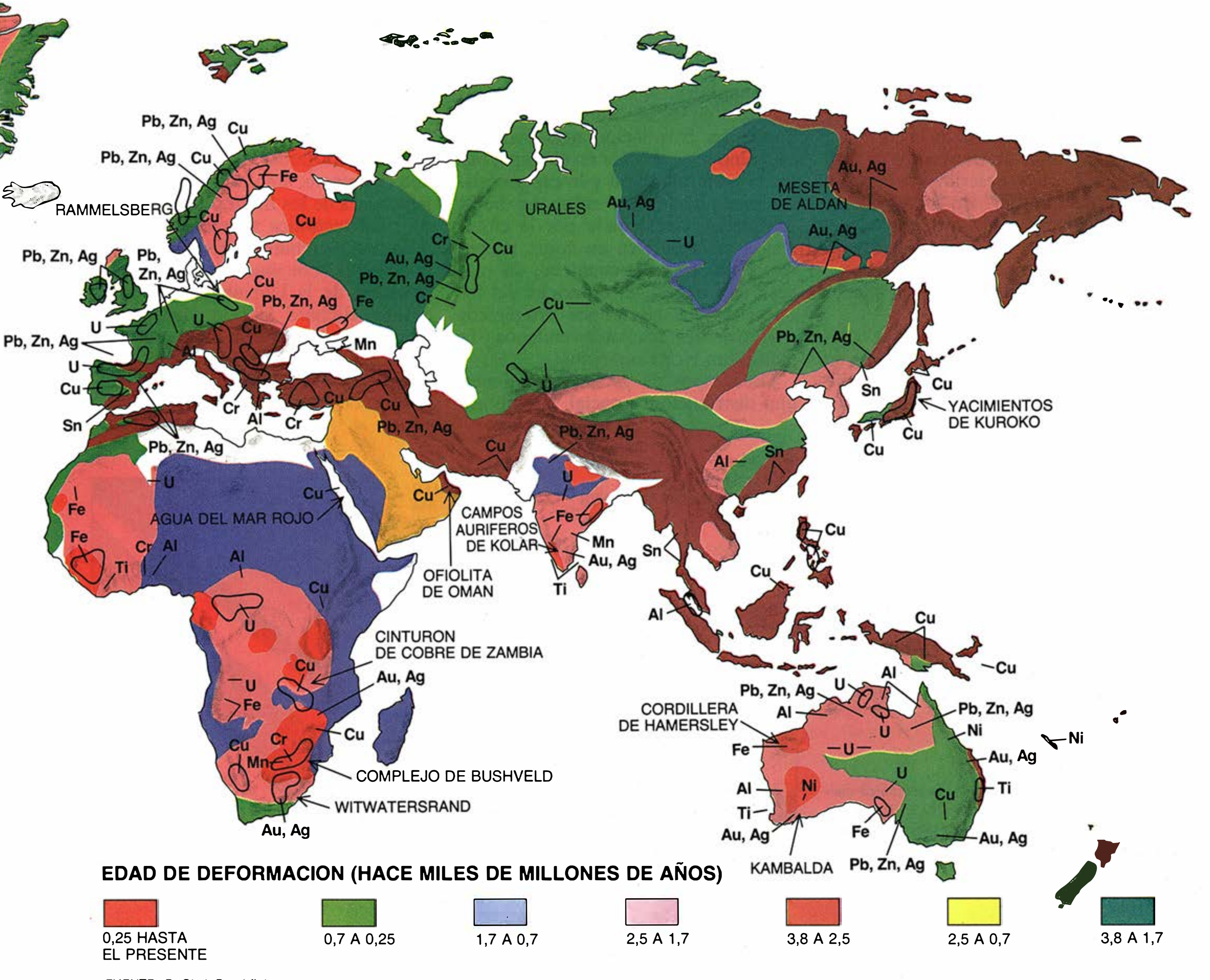
Además de la situación de los yacimientos minerales concentrados, los geólogos conocen las características de las rocas que los albergan. Las concentraciones de metales suelen formarse en rocas sedimentarias o volcánicas originadas bajo el agua, sobre tierra firme o por lo menos muy cerca de la superficie. Se trata, pues, de rocas supracorticales. Sólo las condiciones ambientales supracorticales reúnen todos los factores necesarios para la formación de menas, incluyendo su conservación geológica. Para nuestra ventura, las menas se encuentran generalmente a una profundidad donde se pueden explotar.

Pero no todo es fortuna. En la proximidad de la superficie se dan ciertos fenómenos; en primer lugar, se registran fuertes gradientes en las condiciones físicas y químicas porque la superficie terrestre es la interfase entre la tierra sólida, la atmósfera y la hidrosfera. En virtud del brusco gradiente térmico que allí se da, precipitan los minerales de mena al enfriarse los magmas y las soluciones hidrotermales.

Y lo que quizá prima allí la formación de menas sean las propiedades físicas de las rocas cercanas a la superficie, insólitas si las comparamos con las que se dan en las profundidades de la corteza y del manto. En las grandes profundidades, con presiones altas, no suele haber fracturas en las rocas; en la superficie predominan, por contra, las rocas fracturadas. Las bajas temperaturas y presiones que hay cerca de la superficie hacen que las rocas, que son frágiles, se agrieten de repente bajo las tensiones tectónicas y locales. Frente a ello, las altas presiones y temperaturas que reinan en las profundidades facilitan la adaptación gradual de las rocas a las tensiones, que cedan por compresión o por fluencia plástica y sean, en consecuencia, menos permeables.

Las grietas permiten el paso y la circulación rápida de fluidos acuosos y magmáticos, que revisten, a su vez, especial interés en el proceso de transporte de mineral. El magma de silicatos es uno de los fluidos que transportan metales. Cuando los elementos están cerca de la superficie, entran en acción distintos líquidos: agua del magma, vapor, agua marina y agua subterránea. Comparados con la viscosidad del magma, se trata de fluidos muy móviles; y muy reactivos químicamente, lo que los convierte en excelentes solventes para sales, ácidos y bases, todos los cuales disuelven bien los metales.

A través de las cadenas de fractura, el agua subterránea, el agua marina y



FUENTE: *B. Clark Burchfiel*

2. DISTINTAS ERAS de cambios en la corteza correspondientes a los grandes yacimientos minerales. Al crecer los continentes primarios por acreción de la corteza, se depositaron varias clases de menas. El hierro se concentró principalmente en las rocas del Proterozoico primitivo (*rosa*) que había alrededor de rocas arcaicas más antiguas (*rojo*). Los yacimientos minerales también se corresponden con la orogénesis, o formación de montañas, y otros procesos.

ELEMENTOS

Cu	COBRE	Ni	NIQUEL
Fe	HIERRO	Mn	MANGANESO
Au, Ag	ORO Y PLATA	Al	ALUMINIO
Pb, Zn, Ag	PLOMO, CINC Y PLATA	Ti	TITANIO
Mo, W	MOLIBDENO Y TUNGSTENO	Sn	ESTAÑO
Cr	CROMO	U	URANIO

fluidos similares tienen fácil acceso a las rocas formadas en el subsuelo. Entre esos fluidos y los minerales al descubierto en las rocas encajantes se producen violentas reacciones químicas, fenómeno que afecta a la composición de las rocas y de los fluidos mediante mutua interacción.

Cuando cambia la composición del fluido que transporta el mineral, disminuye su capacidad para transportar metales. Por ejemplo, los oxácidos se neutralizan y reducen al atravesar las rocas y alterar los minerales. Las reacciones de oxidación-reducción e hidrólisis son causas normales de la precipitación de menas de sulfuros metálicos.

Además de reaccionar químicamente, los fluidos pueden ir fraccionándose o destilándose en diversas fases. Los metales pueden entrar preferentemente en una u otra fase y separarse del fluido originario. En estas fases tardías intervienen ya vapor y agua fuertemente salada.

En el curso de la historia geológica han ido cambiando las interacciones entre fluidos y rocas. La evolución de las distintas condiciones tectónicas, así como la de la biosfera y la atmósfera, modificó la composición de rocas, minerales y fluidos que estaban implicados. De cómo se reflejan esos cambios en la formación de las menas se han ocupado, entre otros, Richard W. Hutchinson, de la Escuela de Minas de Colorado, William S. Fyfe, de la Universidad de Ontario Occiden-

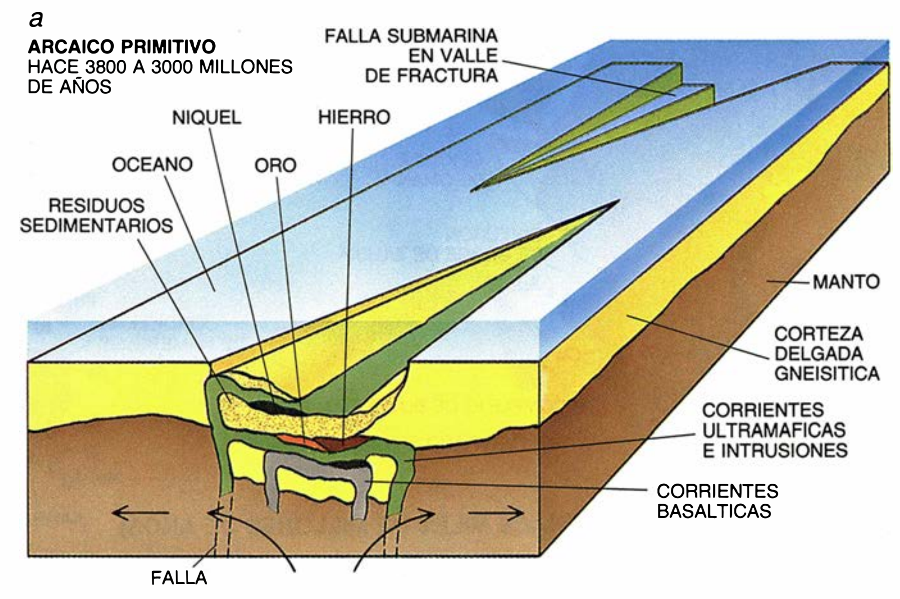
tal, Heinrich D. Holland, de la Universidad de Harvard, y Charles Meyer, de Berkeley.

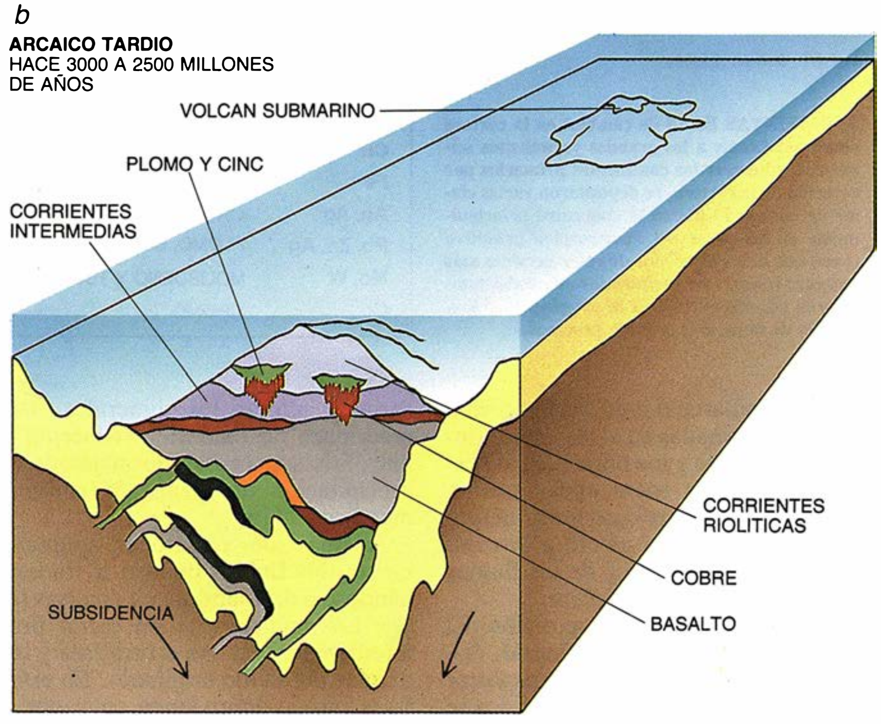
La distribución de las principales minas nos ilustra bastante sobre la naturaleza evolutiva de la corteza y los mecanismos de transporte de fluidos. Estas minas describen la relación de la "maquinaria" de formación de menas con las fuerzas que crean el perfil terrestre y con las deformaciones esenciales que facilitan el acceso de los fluidos desde las profundidades hasta la superficie.

Para comprender las pautas geoquímicas gobales, muy complejas, de los múltiples tipos de yacimientos minerales, debemos clasificar las minas según el metal predominante, la clase de ambiente donde se depositaron y la edad del yacimiento. Esta clasificación es necesaria porque la formación de la mena y los acontecimientos geológicos con los que está relacionada ocurrieron a través de procesos espontáneos. Los episodios disipan energía, lo que refleja la degradación lenta e irreversible de los recursos energéticos de la Tierra. Idea ésta que labora contra el uniformitarismo, principio de interpretación geológica en virtud del cual el presente encierra la clave perfecta del pasado.

Considerando el lugar y el tiempo en que se han formado los yacimientos minerales, se nos aclararán otros aspectos de los mecanismos de transporte. La correlación más evidente es, como se puede ver en el mapa, entre la mineralización y la orogénesis. La precipitación de cobre en bajas cantidades, ocasionada por la circulación de agua rica en cobre procedente del magma, acontece, de manera casi exclusiva, en zonas del interior de los cinturones orogénicos más recientes: los Andes chilenos y la Cordillera Norteamericana.

Otros tipos de yacimientos tienen una distribución espacial y temporal definida, si bien se hallan, así parece, desconectados de las estructuras tectónicas actuales como la orogénesis. Para mejor entender los diversos tipos de yacimientos minerales, clasificaré las condiciones ambientales de formación de menas no sólo según la distribución global de minas descrita anteriormente, sino también según la naturaleza de los fluidos y el esquema de edad tectónica supracortical definido por Hutchinson. Este guión explicativo le debe mucho a Frederick J. Sawkins, de la Universidad de Minnesota, Richard Sillitoe, profesional londinense no adscrito a ninguna institución académica, Samuel Epstein y Hugh Taylor, del Instituto de Tecnología de California.





a
Durante el Arcaico primitivo, la tectónica cortical formó yacimientos minerales en los rifts o depresiones marinas. Las lavas ricas en magnesio y hierro, o ultramáficas, reaccionaron con el agua oceánica y crearon rocas verdes primarias con sus yacimientos asociados de níquel, cobre, hierro y oro.

b
Algunos cambios en el Arcaico tardío fundieron las cortezas más antiguas y se formaron yacimientos minerales en rocas verdes más recientes, o secundarias. La lava entró en erupción sobre el suelo marino y reaccionó con el agua, induciendo la lixiviación de metales (cinc y cobre) y la precipitación de yacimientos de sulfuros.

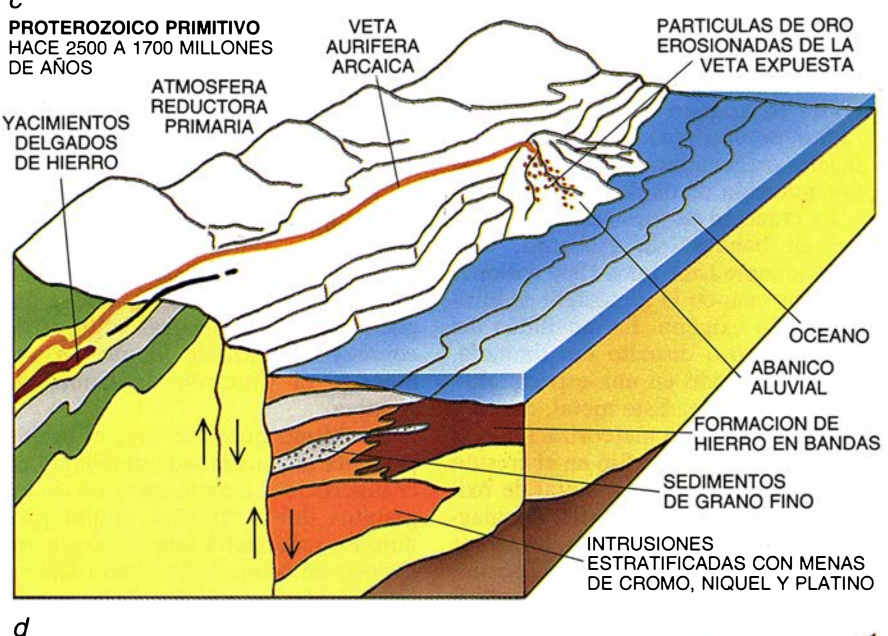
c
Durante el Proterozoico primitivo, las fallas tectónicas pusieron al descubierto y erosionaron menas más antiguas, de cuyo acarreo se ocuparon los ríos. Del agua de mar precipitaron las formaciones de hierro en bandas; las intrusiones en la corteza continental crearon yacimientos de cromo y platino.

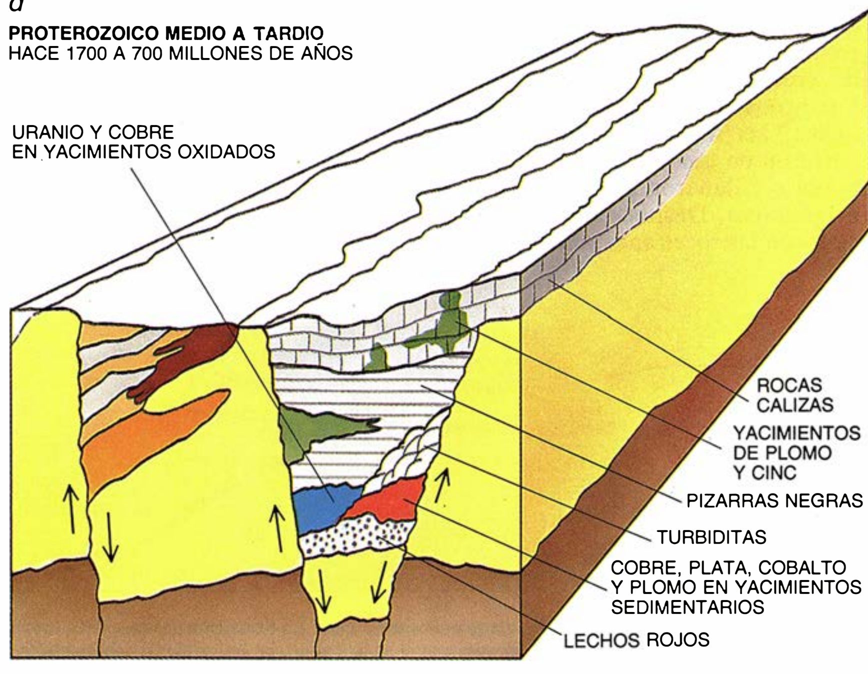
d
Después de la oxigenación de la atmósfera, durante el Proterozoico medio y tardío, se formaron yacimientos estratificados de cobre, uranio, cinc y plomo. Las aguas saladas densas, que procedían de las cuencas sedimentarias, reaccionaron con las rocas calizas para formar yacimientos de sulfuro de plomo y cinc.

Podemos dividir la deposición en cinco eras tectónicas generalizadas, caracterizada cada una por su mecanismo de transporte y su grupo de yacimientos minerales. (Desde luego, la interpretación es menos segura cuanto más antiguo es el proceso.) Se trata del Arcaico primitivo (que duró desde hace 3800 millones a 3000 millones de años), Arcaico tardío (de 3000 a 2500 millones de años), Proterozoico primitivo (de 2500 a 1700 millones), Proterozoico medio y tardío (de 1700 a 700 millones) y Fanerozoico (de 700 millones de años hasta el presente).

La falta de pruebas geológicas anteriores al Arcaico primitivo obedece al intenso bombardeo de meteoritos que sufrió la Tierra y al completo reciclado de la corteza en el manto. A partir de unos 3800 millones de años atrás, sí podemos empezar a documentar los cambios que conformaron la superficie terrestre.

Podemos estudiar los cambios ocurridos en el transporte de minerales. Durante el Arcaico primitivo, la mayoría de los minerales se depositaron en el fondo marino, o en su proximidad, por la erupción de lavas, a partir de las cuales precipitaron los sulfuros y se sedimentaron en estratos. El agua marina caliente, que corría a través de las lavas, arrastró consigo los metales, que precipitaron y cayeron al fondo marino cerca de fuentes termales. En un tiempo más reciente, agua meteórica, o dulce, intervino en la génesis de las menas. (Desconocemos si el registro de este cambio es real o está causado simplemente por la destrucción de ejemplos más antiguos de estas menas superficiales.)





Los testigos más antiguos muestran que las menas se formaron primeramente en depresiones submarinas alargadas. En estos surcos, que a menudo se presentan en conjuntos paralelos, lavas primitivas ultramáficas y máficas (es decir, ricas en magnesio y hierro) ascendieron hasta la superficie y entraron en erupción en el fondo marino durante la ascensión de los protocontinentes. En la actualidad, el sílex, una roca sedimentaria rica en cuarzo y generalmente de color gris, y las lavas almohadilladas reflejan la naturaleza submarina de estos estratos volcánicos primitivos.

La extensa corteza oceánica posee ese mismo origen. Su composición se alteró con el tránsito de agua marina a través de las lavas máficas fracturadas, produciendo minerales secundarios verdosos. Debido a su color y porque son el tipo de corteza volcánica oceánica más antiguo que se conoce, Andrew Glikson, del Departamento de Recursos Minerales en Canberra, llamó glauconitas primarias a los componentes de esos estratos.

Los cinturones de rocas verdes primarias albergan tres tipos principales de yacimientos minerales. Los sulfuros de níquel y cobre, gotas en los magmas, se sedimentaron en el fondo de las lavas ultramáficas formando algunas de las ricas menas de Kambalda en Australia Occidental, descubiertas por Roy Woodall, de la Compañía Minera australiana de Occidente. La reacción química del agua marina con la lava del fondo marino produjo también la precipitación de los sedimentos ricos en hierro.

El tercer tipo de yacimiento que se encuentra en los cinturones de rocas verdes primarias consta de sedimentos ricos en oro: formaciones de sílex, carbonatos y sulfuro de hierro. Semejantes a los estratos volcánicos y sedimentarios acabados de describir, nacieron también de erupciones en el fondo marino en las que intervenía la circulación de agua marina. Durante el lento metamorfismo posterior, estas protomenas estratificadas se lixiviaron de su contenido metálico, que luego se concentraría en filones, o vetas, como en el cinturón Abitibi de Quebec o los campos de oro de Kolar en la India. Por sorprendente que nos parezca, esas rocas tan antiguas han permanecido más o menos intactas.

Por último, durante el Arcaico tardío, la incesante erupción submarina de densas lavas ultramáficas provocó la subsidencia de las series primarias de rocas verdes. A medida que iban penetrando en profundidades mayores, los estratos quedaban sometidos a temperaturas superiores y mayores efectos metamórficos; e incluso se fundieron. Al fundirse, se formaron nuevos magmas y ascendieron hasta la superficie, apilados a menudo uno encima de otro en secuencias de basalto y riolita, una roca rica en sílice y parecida al granito. Estas constituyen las rocas verdes secundarias; su formación implicó la fusión y la diferenciación de lavas más primitivas.

Durante el Arcaico tardío se crearon grandes menas de sulfuro de cinc y de cobre en el fondo marino, a partir de aguas saladas densas y ricas en metales que lixiviaron los metales de las pilas volcánicas calientes que había debajo. Subyacentes a esos sulfuros, originados cerca de humeros del suelo marino, se extienden zonas de alimentación entrelazadas con vetas de sulfuro de cobre. Los sulfuros debieron de producirse después de una fase riolítica de erupción y durante el enfriamiento del material volcánico subyacente, antes de la siguiente erupción.

El tercer tipo de condiciones tectónicas supracorticales se presentó durante el Proterozoico primitivo. Los yacimientos minerales se originaron en depresiones que estaban en sistemas de fosas o rifts continentales, próximos a ellas o en el suelo. De acuerdo con lo observado, los rifts se formaron cerca de los márgenes continentales, sin importante actividad volcánica orogénica.

Los bloques más antiguos de corteza elevados por la presión, que contenían yacimientos minerales primitivos, se erosionaron y aportaron los sedimentos de esta era. Los abanicos aluviales depositaron sedimentos que contenían oro. (Las corrientes fluviales podían concentrar el oro porque posee una densidad alta comparada con los minerales comunes.) Los minerales pesados se concentraron en el lecho del curso. Por eso los yacimientos de ríos antiguos, o placeres, como el Witwatersrand en Sudáfrica, almacenan una fracción importante de las reservas mundiales de oro.

Al mismo tiempo, las corrientes fluviales acarreaban la pirita de ganga, un mineral compuesto de hierro y azufre, transporte que nos habla de una atmósfera menos oxidante que la actual. Otra clave del estado de la atmósfera en el Proterozoico primitivo nos la ofrece la amplia distribución de yacimientos estratificados de óxidos de hierro que cubren grandes regiones, como la Cordillera Hamersley de Australia Occidental y la región del Lago Superior, en Norteamérica. Según Holland, de la Universidad de Harvard, estas formaciones de hierro en bandas se formaron por sedimentación química. El agua marina fría, pobre en oxígeno y rica en hierro disuelto, se encontró con aguas superficiales oxigenadas, lo que produjo la precipitación de óxidos férricos.

La creación de formaciones de hierro en bandas, sin embargo, cesó bruscamente hace unos 1800 millones de años cuando la atmósfera se enriqueció en oxígeno. La movilidad del hierro ferroso disuelto era limitada, ya que se oxidó en una especie altamente insoluble. Este metal, después de liberarse con la meteorización química de las rocas, se fijó en el crestón o afloramiento como mineral de óxidos estables, bien hematites o magnetita; no pudo continuar hacia los ríos y posteriormente hacia el océano, lo ocurrido hasta entonces.

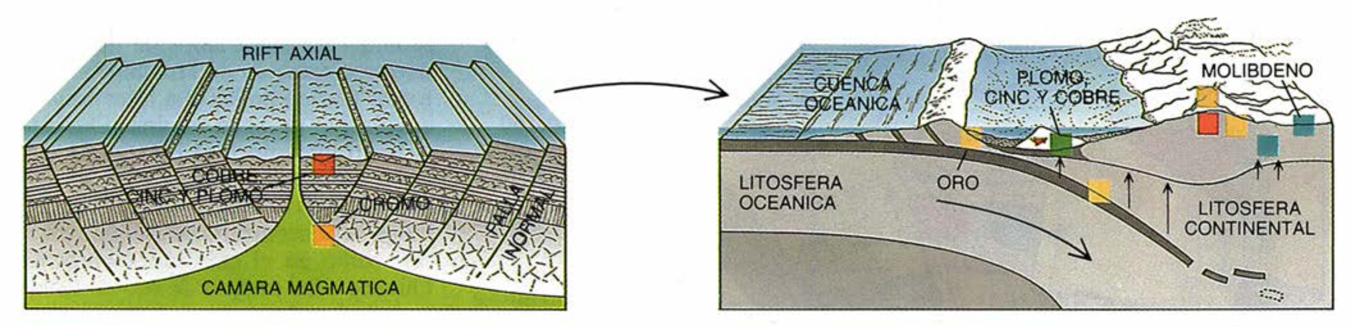
Simultáneamente se comenzó a formar otro tipo de yacimiento mineral en las regiones cratonales, los centros de crecimiento de los continentes. Por primera vez en la historia geológica, las intrusiones máficas penetraron en una corteza continental potente y llenaron grandes cámaras magmáticas. Después de la interacción con las rocas encajantes que los rodeaban, estos magmas precipitaron y dieron origen a yacimientos de cromo y óxidos de hierro y de titanio, así como a los mayores yacimientos de platino del mundo: Bushveld de Sudáfrica y Stillwater, de EE.UU.

Con la oxigenación de la atmósfera, aumentó la movilidad de muchos metales, aparte del ion ferroso. Este cambio marca el comienzo del Proterozoico medio, unos 1700 millones de años atrás. Los rifts continentales volvieron a constituir el sitio de precipitación de metales. Se formaron sedimentos continentales oxidados y de color rojo que incluían la hematites. El océano avanzó sobre esos lechos rojos, donde precipitaron sedimentos orgánicos y ricos en sulfuros. Tal secuencia en capas facilitó las reacciones químicas entre ambos estratos, y las interacciones constituyeron a su vez la base para altos niveles de transporte de metales.

La evaporación en las regiones áridas de los márgenes continentales comenzó a inducir el flujo ascendente de agua desde los rojos lechos oxidados; gracias a ese flujo, los metales entraron en contacto con las pizarras suprayacentes, que portaban abundantes sulfuros. Fruto de ello, se depositaron en las pizarras sulfuros de cobre y cobalto, de lo que es una muestra el Cinturón de Cobre de Zambia.

Lo mismo que el cobre, el uranio presenta una acentuada movilidad en la superficie. La meteorización de los granitos que contenían uranio produjo los principales fenómenos de redeposición cerca de las discordancias estratigráficas y en los rifts continentales que poseían grandes residuos sedimentarios. (Las discordancias estratigráficas son zonas entre las rocas sedimentarias y las infrayacentes, prueba de que no hubo precipitación, sino erosión.)

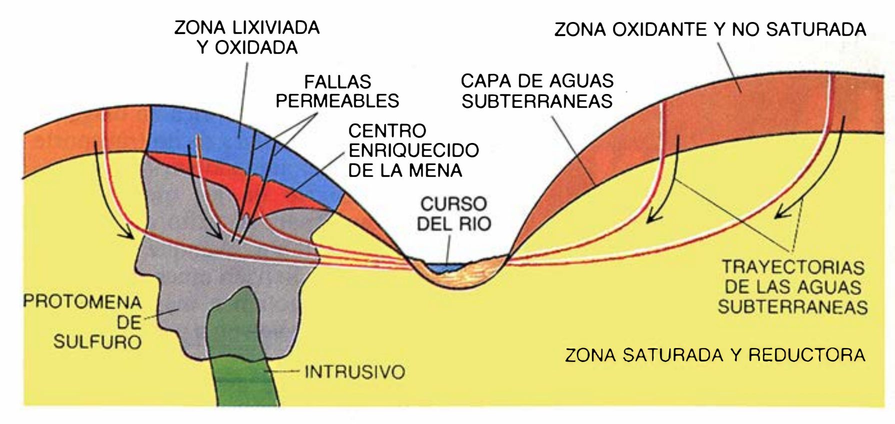
En los márgenes de cuencas sedimentarias potentes, las rocas calizas se sustituyeron por aguas saladas ácidas, expulsadas durante la compac-



3. CON LA TECTONICA CORTICAL del Fanerozoico han tenido que ver los centros de separación del fondo marino, la subducción y las zonas orogénicas de los márgenes continentales. La formación de menas continúa al reaccionar el magma con el agua y penetrar en las placas continentales.

tación de la cuenca. Los yacimientos de plomo y de cinc del valle del Mississippi se formaron de esta manera por neutralización, según lo ha enseñado Dimitri A. Sverjensky, de la Universidad Johns Hopkins.

El Fanerozoico es la quinta y última era supracortical de la precipitación de menas. Por ser la era más reciente de la historia de la Tierra, se entienden bastante bien sus rasgos característicos. Muchos procesos de transporte de fluidos siguen operando y son objeto de estudio directo mediante observación, que no de mera inferencia deductiva.



4. METEORIZACION, proceso decisivo en la concentración de menas. Por encima de la capa de aguas subterráneas, los poros de las rocas llenos de aire oxidan el cobre promoviendo la lixiviación de la mena. Cuando el cobre alcanza la capa freática, donde hay menos oxidación, vuelve a precipitar. Este enriquecimiento secundario hace que las menas de cobre se puedan explotar en minas.

La configuración actual de los continentes y océanos arranca de la fragmentación protocontinental que comenzó hace unos 200 millones de años con la dilatación del suelo marino. En el interior del manto se produjeron poderosos fenómenos de convección, que dividieron la litosfera en grandes placas móviles. El grueso de la deposición de menas correspondió a los márgenes de estas placas, en los puntos donde se crearon o deformaron y se consumieron.

El entorno de formación de menas del Fanerozoico varía de una a otra. Intervienen fluidos dispares: magmas de silicatos intrusivos y extrusivos, agua marina y agua meteórica. Muchos metales importantes se depositaron, pues, en varios tipos de yacimientos minerales.

De manera particular, el suelo marino se ha prestado a descubrimientos muy sugestivos. Las ofiolitas, una suerte de rebanadas del antiguo fondo marino, suelen albergar buenos yacimientos de sulfuros ricos en cobre. El transporte lateral sobre la astenosfera lleva las menas hasta los márgenes continentales. La aceptación de la teoría de la tectónica de placas movió a asignar la formación de esas menas a los centros de expansión del suelo marino, donde el agua lixiviaría los metales y los precipitaría de nuevo en forma de sulfuros. Los submarinos de gran profundidad, como el *Alvin*, permitieron más tarde observar zonas de cráteres hidrotermales activos. La hipótesis se confirmó con el descubrimiento de sulfuros metálicos, conocidos como humeros negros, en el fondo marino.

La subducción de la corteza oceánica en los cinturones orogénicos causa, así parece, la fusión parcial de la corteza oceánica, de la corteza continental suprayacente y del manto. Los magmas ascienden y entran en erupción para formar los volcanes "andinos" de América del Norte y del Sur. Magmas que, si son ricos en agua, liberan un fluido acuoso durante su recorrido ascendente y luego se solidifican. Las sales magmáticas y el cobre se fraccionan en el agua que se desprende; ésta rompe las rocas circundantes al producirse su violenta expansión. Los fluidos acuosos circulan dentro de esta red permeable, impulsados por el calor desprendido por el enfriamiento del magma intrusivo. Los fluidos y las rocas que quedan expuestas interaccionan con fuerza y provocan la precipitación de los sulfuros de cobre; mediante ese proceso se originaron tres cuartas partes de las reservas de cobre conocidas.

Un nuevo tipo de yacimiento de oro relacionado con las subducción se identificó en zonas donde antaño se había beneficiado el mercurio. (La afinidad del mercurio por el oro es conocida y explotada en los procesos de amalgamación.) Este nuevo tipo de yacimiento, identificado por Don Gustafson, geólogo que ejerce liberalmente la profesión en Reno, se origina en la falla permeable de contacto entre los sedimentos marinos arrancados de la placa Pacífica subducida y las areniscas situadas encima, donde la actividad de las aguas termales ocurría cerca de centros volcánicos.

Las fallas regionales controlan otros tipos de sistemas de vetas auríferas guiando la circulación de grandes cantidades de fluidos acuosos a través de las rocas metamórficas; es el caso del Filón Madre de California, que, según John K. F. P. Bohlke, del Laboratorio Nacional de Argonne, podría constituir una antigua zona de subducción a lo largo de la cual el agua marina o el agua metamórfica circularon a grandes profundidades.

Las partículas de oro erosionado de los yacimientos minerales primarios, el Filón Madre es uno de ellos, se acumulan en los cursos fluviales, donde los encontraron unos pocos afortunados buscadores de oro. Estos yacimientos secundarios son, en muchos aspectos, versiones menores y más recientes de los antiguos conglomerados de oro y uranio del Witwatersrand. Muchos yacimientos minerales primarios formados en el Fanerozoico se han descubierto por retroprospección: rastreando el origen de los lugares secundarios y posteriores de precipitación superficial de mineral.

Pero no sólo se depositó oro. Durante el Fanerozoico, se acumularon estaño y otros minerales pesados en el lecho de los ríos gracias al transporte erosivo desde las zonas montañosas de origen. La deposición de otros metales, como aluminio, níquel u oro, tuvo lugar en parajes bajos, o subducidos, donde la erosión fue mínima. Estos yacimientos subsuperficiales se originaron por la meteorización química de las rocas en condiciones oxidantes.

Las bauxitas y las lateritas, acumulaciones residuales de aluminio y hierro, aparecen en regiones donde las tormentas tropicales y las altas temperaturas promovieron fuertes reacciones químicas entre el agua superficial y las rocas. La lixiviación, que eliminó la mayoría de los elementos, dejó un residuo enriquecido en minerales insolubles, que contenía aluminio, níquel u oro. Hemos demostrado que, además de la meteorización química, en el enriquecimiento de los yacimientos de bauxita intervienen el transporte y la precipitación del polvo aluminoso arrastrado por el viento. El propio viento se convierte entonces en un fluido activo en la formación de menas, especialmente a lo largo de las trayectorias del polvo, donde los suelos actúan de sumideros de polvo.

La combinación de aire y agua adquiere particular eficacia en el transporte local del metal en el subsuelo. La atmósfera actual, rica en oxígeno, resulta decisiva para dicho transporte regional, denominado enriquecimiento secundario de las menas, muy importante para el éxito de una explotación minera. Aunque las aguas subterráneas lixivian muchos elementos, según anotamos más arriba, el cobre y otros vuelven a precipitar más adelante.

Las rocas que están encima de la capa freática tienen poros y fracturas llenas de aire. En presencia de oxígeno, la pirita, el mineral de sulfuro más corriente, y la mayoría de los sulfuros se oxidan para formar ácido sulfúrico y iones metálicos móviles. Al filtrarse hacia abajo el agua ácida que transporta los iones, éstos se encuentran con capas de aguas subterráneas. La reducción sustituye a la oxidación en esta zona; los iones de cobre sustituyen a la pirita. En algunas ocasiones, este proceso duplica la riqueza de la mena situada debajo de la capa de agua subterránea.

Muchos yacimientos minerales primarios, puestos al descubierto por la presión de elevación o por la erosión, sufrieron la meteorización y la oxidación por las aguas subterráneas que se filtraban. Los metales, lixiviados cerca de la superficie, volvieron a precipitar en una capa freática local o en su vecindad, culminando la sucesión de procesos que desembocan en la deposición del mineral. Sin este enriquecimiento secundario no podría beneficiarse la mayoría de los yacimientos de cobre del Hemisferio Occidental.

Los entornos sujetos a meteorización son quizás el sistema de formación de menas mejor conocido, porque allí opera el desplazamiento descendente de los fluidos. El agua abandona los restos de la protomena oxidada y lixiviada expuesta a la intemperie. Los mineros penetran, entonces, en la zona subyacente del enriquecimiento secundario, lo que hace que estos yacimientos sean muy fáciles de estudiar, a diferencia de la parte primaria del sistema. Resulta inverosímil que ese enriquecimiento sucediera antes de la oxigenación de la atmósfera, como lo prueba la presencia de pirita en el Witwatersrand.

El enriquecimiento oxidativo ocurre cerca de la superficie terrestre y está relacionado con factores hidrológicos, verbigracia, la posición de la capa de aguas subterráneas. Está controlado, en definitiva, por los cambios climáticos que influyen en las precipitaciones de lluvia. Las condiciones óptimas para un enriquecimiento secundario de cobre se alcanzan durante la transición de un clima húmedo a uno seco, ya que el descenso de la capa de aguas subterráneas expone más sulfuros primarios a la meteorización oxidativa. Con Charles Alpers, hoy en la Universidad McGill de Montreal, he demostrado que el intenso enriquecimiento supergénico, o descendente, de los yacimientos de cobre en el desierto chileno de Atacama ocurrió hace 15 millones de años durante una importante transición climática del tipo mencionado.

Además, mientras las transiciones climáticas suministran los requisitos previos para el enriquecimiento apoyan un mecanismo necesario de realimentación para la conservación de las menas enriquecidas. Al descender la tasa pluviométrica hasta su actual estado hiperárido, disminuyó la tasa de erosión, protegiendo los yacimientos de un desgaste ulterior.

Desde su formación hasta su modificación en la superficie terrestre, los yacimientos minerales son geológicamente inestables y reflejan los procesos dinámicos del interior de la Tierra, así como las influencias climáticas y atmosféricas sobre los sistemas hidrológicos. Al ser sistemas supracorticales altamente reactivos, sirven de sensores geoquímicos y aportan registros detallados y elementos indicadores que nos permiten inferir la historia, las vías de transporte y las fuerzas que operan en la corteza.

A medida que vamos conociendo mejor el complejo transporte de metales hasta sus lugares de precipitación, se hace más evidente el delicado equilibrio que se necesita para la conservación de las menas. La investigación sacará a la luz la velocidad de los procesos superficiales implicados, mientras los metales siguen respondiendo enérgicamente a los cambios que modifican su entorno.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATLAS OF ECONOMIC MINERAL DEPOSITS. Colin J. Dixon. Cornell University Press, 1979.

MINERAL DEPOSITS AS GUIDES TO SUPRACRUSTAL EVOLUTION. R. W. Hutchinson en *Evolution of the Earth*. Dirigido por R. J. O'Connell y W. S. Fyfe. American Geophysical Union, 1981.

METAL DEPOSITS IN RELATION TO PLATE TECTONICS. Frederick J. Sawkins. Springer-Verlag, 1984.

PRELIMINARY FRACTIONATION PATTERNS OF ORE METALS THROUGH EARTH HISTORY. George H. Brimhall en *Chemical Geology*, vol. 64, n.º 12, págs. 1-16; 25 de agosto de 1987.

Genética del caballo pura sangre

Los pura sangre son los animales domésticos más apreciados. También, los que menos se han beneficiado de la genética moderna. ¿En qué medida contribuye la herencia en el rendimiento en las competiciones?

Patrick Cunningham

La cría y las competiciones de los caballos pura sangre fueron antaño recreo exclusivo de reyes. Hoy es un deporte popular. Las competiciones de los pura sangre y cuanto les rodea genera una floreciente industria del ocio que da empleo a miles de personas. En 1984 se pagaron 1500 millones de dólares en premios en diferentes carreras de todo el mundo; en Estados Unidos se concedió más de la mitad. En el mismo año el total de las apuestas oficialmente reguladas se elevó a 3300 millones de dólares; de ahí que el juego de las carreras esté sujeto a severa reglamentación en varios países. Para los implicados en la cría del caballo de carreras y para sus propietarios se trata de un negocio, un deporte, una forma de arte, una estrategia impositiva y una especulación financiera.

Debido en parte a intereses tan dispares, se han realizado muchos menos estudios organizados sobre la genética del pura sangre que sobre la genética de otras especies domésticas. Las limitadas dimensiones de una empresa media dedicada a la cría constituyen un factor de desaliento para tal tipo de investigación. La cría de cerdo y aves está, por lo común, en manos de compañías que tienen los recursos y los incentivos económicos para aplicar la teoría moderna de la genética de poblaciones a sus programas de mejora. La cría del vacuno está también dominada por empresas agropecuarias con sección de inseminación artificial, encargada de ejecutar ambiciosos programas de mejora planificados con criterios científicos. No existen en el mundo del pura sangre tales concentraciones ganaderas.

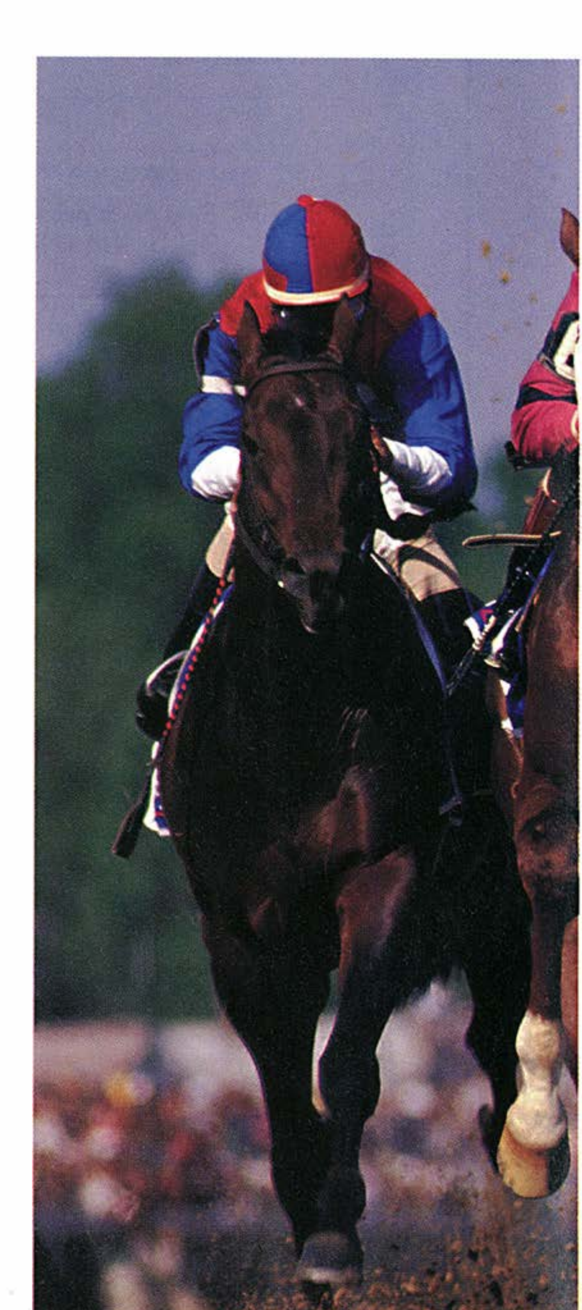
PATRICK CUNNINGHAM, profesor de genética animal en el Trinity College de Dublín, ha trabajado durante más de 20 años en diferentes aspectos de la mejora del ganado. Hasta 1988 estuvo al frente de la sección de cría y genética animal del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias irlandés. Dirige ahora, en Roma, la división de salud y producción animal de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Ello no empece que el pura sangre sea, desde muchos puntos de vista, el animal ideal para la experimentación genética. De todos los animales domésticos es el que posee el historial mejor documentado, con meticulosos registros de pedigríes que se remontan a más de 20 generaciones. La cría sólo tiene un objetivo: vencer en la pista; por cuya razón se anotan todos los pormenores relativos a los rendimientos de cada individuo a propósito de ese carácter.

Los estudios genéticos del pura sangre revisten hoy particular interés, si nos fijamos en los dos problemas que el sector debe resolver. En primer lugar, la fertilidad, bajísima, del pura sangre: en promedio global, se producen sólo algo más de 50 potros por cada 100 yeguas pura sangre. En la cabaña británica e irlandesa la tasa de reproducción es algo mayor, alrededor de 67%, pero incluso esta cifra resulta paupérrima comparada con los porcentajes de otras especies uníparas; a modo de ejemplo, en el ganado vacuno se considera normal una tasa del 85%.

El segundo problema se refiere al rendimiento. Frente a lo que pudiera esperarse de los esfuerzos en la cría y adiestramiento de los campeones, el rendimiento en calle de los pura sangre no progresa de manera uniforme. Las tres carreras clásicas de Inglaterra son la St. Leger, una carrera de 1,75 millas abierta a machos y hembras, y las copas de Oaks y Derby, competiciones de 1,50 millas para potras y potros, respectivamente. Los tiempos de los ganadores en estas carreras mejoraron de 1840 a 1910; de entonces acá se han mantenido bastante estabilizados.

Infertilidad y estabilización del rendimiento que la genética podría atribuir al reducido acervo de genes con



1. CABALLOS PURA SANGRE, seleccionados a lo largo de más de tres siglos para competir en las carreras. Aunque existe meticulosa documentación sobre la genealogía y registros de participación, la genética no había aplicado sus métodos, hasta muy recientemente, a esta especie.

que cuentan los pura sangre. Los altos niveles de consanguinidad podrían limitar la fecundidad; la selección, haber conseguido alguna combinación óptima de los caracteres de la carrera. Pero, sin investigación genética, nunca sabremos si esas explicaciones son o no correctas.

Mi equipo del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias comenzó a trabajar en ese campo hace unos 16 años, a raíz de una entrevista que tuve con el entonces ministro irlandés de agricultura, quien además era un destacado criador y propietario de caballos de carreras. Me expuso su insatisfacción por la falta de métodos científicos en ese sector. ¿Podríamos remediar la situación en el Instituto? El ministro se convirtió, andando el tiempo, en jefe de gobierno, mientras nosotros nos habíamos ya sumergido en un programa de investigación para establecer la base científica de la promoción del pura sangre.

Nuestro trabajo abrió nuevas perspectivas en lo concerniente a los orígenes de los caballos de carreras. La cabaña moderna del pura sangre desciende de un grupo reducido de sementales importados del norte de Africa y del Oriente Medio a Inglaterra en el alborear del XVII. Menor es la información que se dispone sobre las yeguas pertenecientes a la generaciones fundadoras; muchas fueron importadas a partir del mismo origen.

Durante un siglo, la población se mantuvo bastante restringida. El deporte de las carreras de los pura sangre se circunscribía a la corte. Los Tudor y los primeros Estuardo cuidaron las yeguadas, que fueron dispersadas por Oliver Cromwell en 1649. Después de la restauración de los Estuardo, el patrocinio real de Carlos II dio un renovado ímpetu a la cría y a las carreras. El deporte fue arraigando a lo largo del siglo XVIII; se establecieron entonces las tres carreras clásicas más antiguas. La de St. Leger en 1776, la de Oaks en 1779 y la de Derby en 1780.

En 1791 James Weatherby propuso el *Stud Book*, o registro genealógico de caballos. En la quinta edición, publicada en 1891, los editores advierten: "La siguiente lista de las yeguas más antiguas que se conocen... preñadas por los sementales importados de Oriente son el origen, con escasas excepciones, del total de lotes actualmente existentes de los llamados pura sangre, como puede verse por la descendencia directa, a partir de ellas, de casi todos los principales sementales." La relación citaba 80 animales fundadores. A partir de esta exigua base, la población del pura sangre se ha expandido y ahora su número se eleva a aproximadamente medio millón en todo el mundo.

Desde su creación, el *Stud Book* ha seguido registrando la genealogía de todos los pura sangre nacidos en Gran Bretaña y en Irlanda. Cada año se inscriben unas 18.000 yeguas. Noso-



Los pilares del *Stud Book*

Tres destacados sementales merecen esa denominación. El trío aparece en las genealogías de una proporción altísima de los actuales pura sangre. Los ofrecemos aquí: de izquierda a derecha, Godolphin Arabian (nacido hacia 1725), Darley Arabian (en torno a 1688) y Byerley Turk (hacia 1690). El gato que acompaña a Godolphin Arabian era su compañero inseparable, y todas las ilustraciones del semental los muestran juntos.

Deberíamos haber agregado a lista tan selecta un cuarto caballo, Curwen Bay Barb, que nació alrededor de 1699; por su legado genético a la población actual de caballos superó al Byerley Turk. Suele pasar inadvertida la importancia de este semental, por más que uno de sus nietos, altamente prolífico, transmitiera muchísimos genes suyos.

Estos cuadros de los caballos fueron pintados por Julio A. Wear. El cuadro de Godolphin cuelga en el Museo Derby de Kentucky en Louisville; los otros dos son de propiedad privada. Los tres se basan en anteriores ilustraciones del famoso pintor John Wootton del siglo XVIII y en registros históricos.



tros hemos analizado los datos genealógicos con el objetivo primario de medir el nivel de consanguinidad. Estos cálculos nos permiten cuantificar la contribución de los antecesores primigenios a la bolsa de genes de la población de hoy.

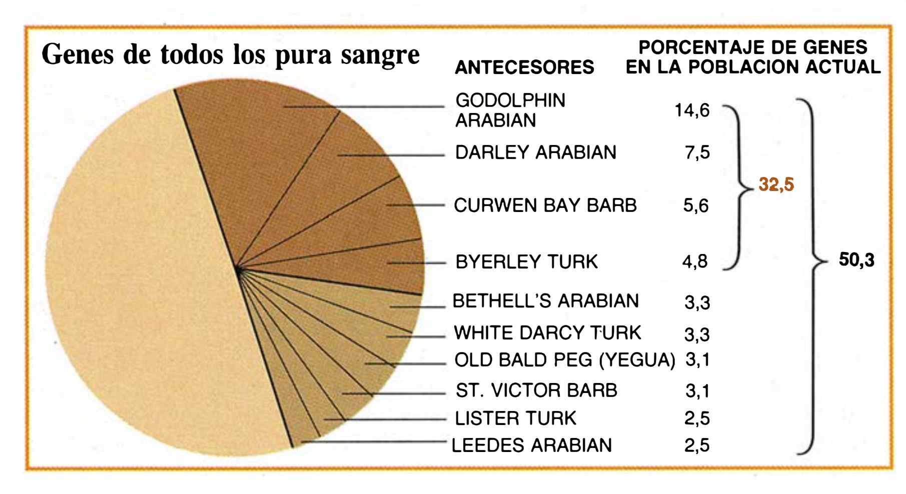
La relación de los individuos más sobresalientes entre los fundadores confirma el predominio de los tres "pilares del *Stud Book*": el Godolphin Arabian, el Darley Arabian y el Byerley Turk. Ese trío de sementales aparece en las genealogías de un buen número de pura sangre. Habría, quizás, un cuarto capaz de emularles, el berberisco Curwen Bay; su contribución genética es ligeramente mayor que la del turco Byerley. La razón de su postergamiento obedece a que la mayor parte de su contribución a la raza procede de un único descendiente, su nieto Partner, que era muy prolífico y que fue parido en 1718. Estos cuatro sementales aportan un tercio de los genes de la población corriente. Con otros seis, son responsables de la mitad del acervo de genes. Si incluimos todos los antecesores con una contribución del 1% o más, la lista abarca otros 21 individuos (11 yeguas) y se responsabilizaría del 80% de la cantidad de genes que suman la población moderna. Esas cifras sugieren que la consanguinidad, que perjudica gravemente la fertilidad de muchas especies animales, podría constituir un problema para el pura sangre.

Para comenzar una investigación sistemática de las causas de la baja tasa de reproducción, necesitábamos determinar la tasa de éxito por cubrición (intentos de acoplamiento). Debíamos también averiguar de qué modo incidía, en esa tasa, la edad de la yegua, el momento en que se producía la concepción, los niveles de consanguinidad y otros factores. Analizamos, pues, los datos de reproducción correspondientes a 2466 cubriciones de 639 yeguas criadas en una yeguada principal irlandesa entre 1964 y 1976.

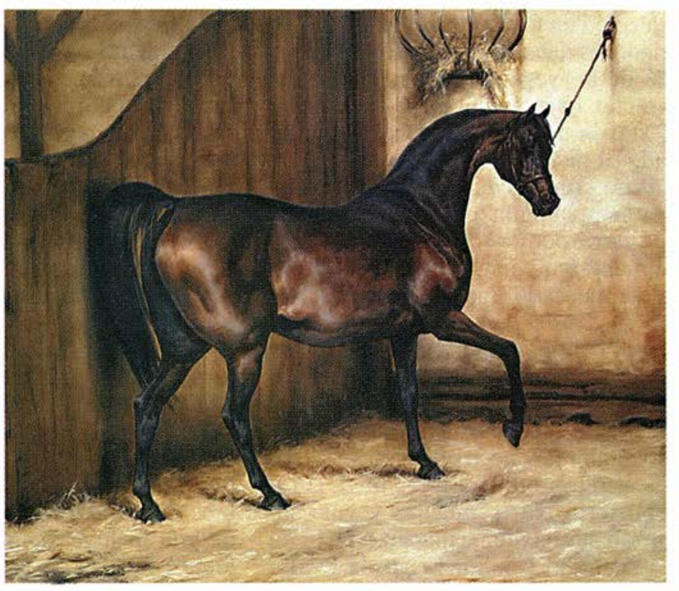
Los resultados indican que sólo un 40% de las cubriciones producen una cría viva. El 2% termina en aborto en el último estadio, el 26% pierde el embrión en fase temprana y el 32% son apareamientos infecundos.

Es difícil separar las pérdidas embrionarias precoces de los acoplamientos infértiles. Nosotros hemos llegado a la conclusión de que, si se da un intervalo entre celos inferior a los 30 días, no ha habido concepción. Las primeras cubriciones de las yeguas suelen tener más éxito que las siguientes, con un 41% de crías vivas frente al 39% en los segundos acoplamientos y el 37% de las terceras cubriciones. Por otra parte, los primeros servicios que tienen lugar después del 15 de mayo alcanzan un 44% de tasa de parto, cifra bastante mejor que el 39% correspondiente a las primeras cubriciones llevadas a cabo en fechas anteriores.

A sólo diez días de producido el parto, muchas yeguas vuelven a entrar en celo; el fenómeno se denomina celo de parto. Los criadores aprovechan ese estro para la fecundación de la yegua, en un intento de adelantar su fecha de parto en la siguiente estación. Alrededor de la mitad de las cubriciones, según nuestros datos, tuvieron lugar durante el calor o celo de parto, pero producen descendencia en sólo un 29% de las ve-



2. DIEZ CABALLOS han aportado más de la mitad de los genes que se encuentran en la población actual de los pura sangre. Los cuatro primeros, incluidos "los pilares del *Stud Book*", en conjunto han donado casi un tercio de los genes que porta la especie hoy.

ces. Ese resultado está muy por debajo del 49% de tasa de gestaciones a término, para las primeras cubriciones durante el siguiente ciclo estral.

Ocurre en muchas especies de mamíferos, nos dice la observación, que sea menos probable el embarazo en madres lactantes que en el resto de las hembras. Pero no parece que la lactación afecte a la fertilidad del pura sangre. De acuerdo con nuestros datos, la fertilidad de 829 yeguas con potros amamantando no difería de la que presentaron otras 489 yeguas que no habían parido en el año anterior.

Podría alguien imaginar que la edad de la yegua condicionara la capacidad engendradora. Pero la edad no incide de forma clara sobre la fertilidad hasta que la yegua no alcanza los 13 años. A partir de entonces, la fertilidad de la hembra comienza a decaer notablemente.

Abordamos entonces los efectos de la consanguinidad. Con Garry A. T. Mahon, del Trinity College de Dublín, analicé un total de 10.569 yeguas del volumen 35 del *Stud Book*, que abarca de 1961 a 1964. Seguimos la historia reproductora de cada yegua retrocediendo hasta los primeros volúmenes y avanzando hacia los posteriores para recoger información sobre casi 100.000 yeguas-años de reproducción.

De cada yegua se calculó un índice de éxito para el total de su vida fértil. Paralelamente a este análisis se calculó un coeficiente de consanguinidad para cada hembra, coeficiente que consiste en el porcentaje esperado de genes idénticos en la descendencia, a tenor de las relaciones de parentesco de los progenitores.

La abrumadora cuantía de computación que esos cálculos implicaban nos obligó a ceñirnos a la obtención de la consanguinidad de sólo cinco generaciones previas. Para un número menor de yeguas, proseguimos el análisis de la consanguinidad hasta los mismos animales fundadores, situados una veintena larga de generaciones atrás.

De acuerdo con nuestro trabajo, ciñéndonos a cinco generaciones la consanguinidad resultante carecía de relevancia (en torno al 1%). Aproximadamente sólo 2 de cada 100 yeguas tenían un coeficiente de consanguinidad superior al 4%. Comparamos las tasas de fertilidad con los niveles de consanguinidad y vimos que la tasa reproductora disminuía alrededor del 7% cuando se elevaba el coeficiente de consanguinidad en un 10%, una reducción que no era estadísticamente significativa, habida cuenta del rango limitado de los niveles de consanguinidad.

Por ello, es difícil establecer una estrecha relación estadística entre los niveles de consanguinidad del pura sangre y la infertilidad. La bibliografía relativa a los efectos de la consanguinidad sobre la fertilidad equina no es muy extensa y ofrece resultados muy variables. Un estudio reciente en "trotadores noruegos" mostraba una caída del 4,3% en la tasa de parto por cada 10% que se elevaba la consanguinidad de la descendencia. No obstante, el nivel medio de consanguinidad en la población que estudiamos era de un 5,7%, mucho más alto que el que encontramos en el pura sangre. Cuando rastreamos la genealogía de algunos individuos retrocediendo hasta los animales fundadores, alcanzamos una media de los coeficientes de consanguinidad del 12,%. Gran parte de esa consanguinidad se puede atribuir a la concentración de genes a partir de unos pocos y destacados sementales del comienzo de 1700. Una vez más, nada probaba que la consanguinidad ejerciera algún efecto significativo sobre la fertilidad normal. A lo largo de las 22 generaciones en que esos caballos se han reproducido, la selección natural reforzada por la eliminación deliberada de las yeguas menos fértiles podría haber contrarrestado algunos efectos deletéreos. La consanguinidad lenta y gradual podría resultar menos lesiva que la rápida.

Dentro de nuestra investigación, nos pareció oportuno, a Mahon y a mí, comprobar hasta qué punto la fertilidad del pura sangre estaba sujeta a control genético. Calculamos la heredabilidad de la fertilidad en virtud del grado de similaridad, a ese respecto, entre hijas de un mismo semental frente a cualquiera otra hembra elegida al azar, dentro de la misma población. La heredabilidad de la fertilidad se cifraba sólo en un 7,7%, valor que nos dice que las diferencias genéticas, en punto a la fertilidad, son culpables nada más que de una fracción pequeña de la variación total de este carácter. Conclusión que está de acuerdo con muchos otros estudios en otras especies e indica que la variación de la fertilidad depende, en buena parte, de factores ambientales.

Cálculos posteriores basados en esta estimación de la heredabilidad confirmaron nuestra creencia de que algunos efectos deletéreos de la consanguinidad pudieron haberse perdi-

do, durante el siglo XIX, gracias a la selección en favor de la fertilidad. Los criadores necesitarían eliminar sólo el 8% de las yeguas que presentasen el carácter baja fertilidad, para contrarrestar la depresión por consanguinidad. El nivel normal de consanguinidad no constituye, así lo creemos en resumen, ningún problema; el daño que haya podido causar una consanguinidad tan persistente se habría visto compensado por la selección.

Si la consanguinidad no es culpable de la infertilidad del pura sangre, habrá que atender a la estacionalidad de la reproducción. Como otros muchos animales no tropicales, el caballo es un reproductor estacional. En el hemisferio Norte muchas yeguas alcanzan su máxima capacidad fértil en mayo, junio y julio; cesan de ovular en enero, febrero y marzo. En el hemisferio Sur la máxima y la mínima se desplazan en un período de seis meses.

De esas pautas de fertilidad estacional variable se han ocupado, en Australia, Virginia E. Osborne, de la Universidad de Sydney, y, en Irlanda, Joe Jennings, del Instituto de Investigaciones Agrarias. Cada uno por su lado, han confirmado que poco más del 20% de las yeguas ovularon en invierno, mientras el 90% lo hacen a la mitad del verano. Será, pues, mucho más fácil obtener éxito en la reproducción de las yeguas en ciertos períodos del año.

Ese hecho puede parecer obvio, pero va en contra de la práctica reproductora rutinaria. En el Reino Unido, Irlanda y EE.UU. todos los caballos que nacen en un año natural oficialmente cumplen un año el 1 de enero del siguiente. En Australia esa fecha para el registro es el 1 de agosto. Los ganaderos, en su afán de que sus ejemplares posean la ventaja de la madurez y de la fortaleza relativas cuando compitan con otros de la misma edad oficial, procuran tener sus crías al comienzo del año. La gestación en una yegua dura 11 meses; la estación reproductora abarca del 15 de febrero al 25 de julio en el hemisferio Norte y del 8 de septiembre al 31 de diciembre en el hemisferio Sur. Si superponemos estas fechas de la estación reproductora sobre los períodos de actividad ovárica, advertiremos de inmediato que la temporada de cría incluye algunos de los meses menos fértiles de la yegua y excluye algunos de los más fértiles. La práctica de iniciar el registro anual el primero de enero en el hemisferio Norte supone, por tanto, un coste, en fertilidad, para la ganadería.

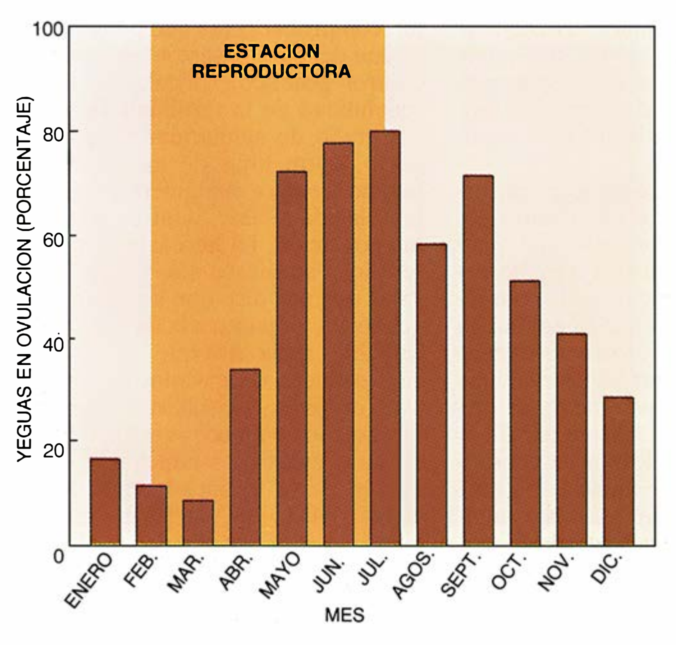
Resulta difícil cuantificar la magnitud de la pérdida porque muchas yeguas entran en la estación de cría preñadas, lo que altera el ciclo siguiente de ovulación. Ahora bien, cerca del 40% de las hembras son vírgenes o no quedaron preñadas en la estación anterior. Para este grupo, calculamos qué efecto neto produciríase en la fertilidad si retrasábamos cinco meses la época de reproducción, fijada el1 5 de febrero.

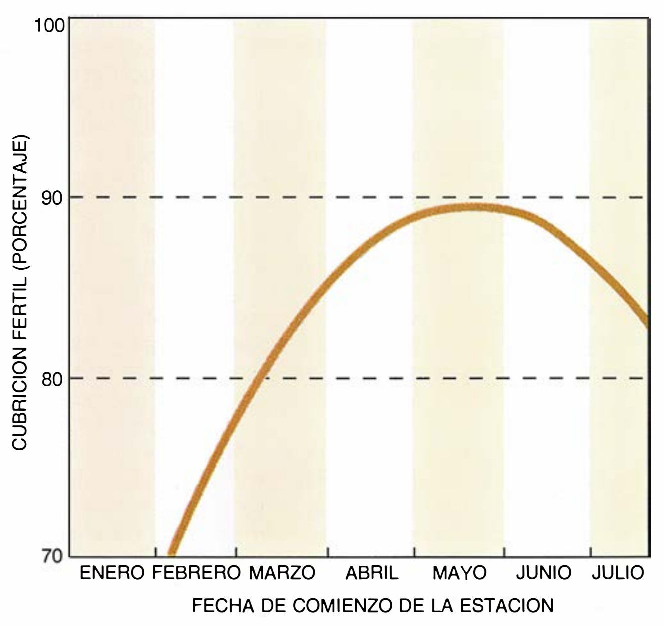
Descubrimos que, en el principio de la estación, cada semana de demora incrementa alrededor de 1,5% la fertilidad neta de las yeguas. Cambiando la fecha de registro del 1 de enero al 1 de marzo y el comienzo de la temporada de reproducción del 15 de febrero al 15 de abril, crecería un 14% la fertilidad del grupo estudiado y quizás un 10% la correspondiente a la población total. Se llega a resultados similares si los cambios de fecha se aplican en Australia. Los beneficios potenciales del cambio revisten interés suficiente para merecer la consideración de los ganaderos.

Sabemos que, por mentira que parezca, el motivo por el que los ganaderos quieren que sus potrillos nazcan a principios de año (para aumentar su valor) resulta, a veces, menos sólido de lo que muchos creen. Con John Ruane, del Trinity, estudié el efecto de la fecha de nacimiento de los potros sobre el consiguiente precio de venta y sobre su rendimiento a los dos o tres años.

Para el análisis de los precios consideramos 553 ventas de potros de un año, en octubre de 1985; calculamos el precio medio de las crías nacidas en cada mes. Los caballos que están a la venta se clasifican en tres grupos: "invitado", con precio medio de venta de 220.000 dólares; "de primera clase", con una media de 36.000 dólares; y "abierto", con una media de 8000 dólares. Descubrimos que el mes de nacimiento no incidía en el precio de venta, ni de las potras ni de los potros, salvo en el grupo "abierto", es decir, en el segmento más barato.

Así interpretamos nosotros esa



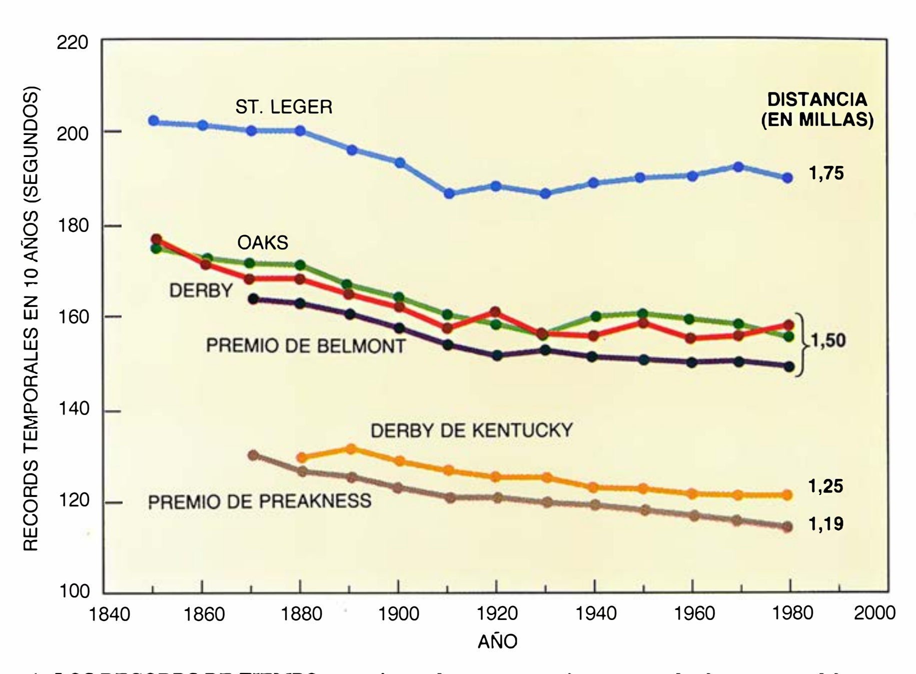


3. FERTILIDAD DE LAS YEGUAS y su fluctuación estacional, puesta de manifiesto con los datos recogidos en una muestra irlandesa (*izquierda*). El número de yeguas en ovulación alcanza el máximo en el verano y llega a su nadir en el invierno y comienzo de primavera. La estación reproductora cae durante algunos de los meses menos fértiles. Si se pospusiera esa estación, la tasa de fertilidad subiría espectacularmente (*derecha*).

pauta del mercado: para los animales más caros y productivos, la genealogía y el exterior del animal determinan, juntos, el precio de venta, con independencia de la fecha de nacimiento; en el grupo de los más baratos, las potras suelen adquirirse para reproducción, sin que importe el mes de nacimiento, ya que no van a correr. De cualquier modo, las diferencias en las genealogías cuentan poco para los potros de bajo precio: se valora el ejemplar de acuerdo con sus rasgos y no con su árbol genealógico. Como la edad se considera una ventaja, se desechan los potros nacidos al final del año.

Potros más jóvenes que podrían incluso infravalorarse según el rendimiento que presenten, como hemos comprobado. Para inferir las dotes de carrera de los pura sangre de dos o tres años nacidos a lo largo de distintos meses, nos servimos de la clasificación de su Timeform, la mejor tabla de rendimientos con que contamos en Gran Bretaña e Irlanda. La clasificación se expresa en libras y representa el valor del handicap que se daría al caballo en una carrera abierta o libre. El Timeform fue establecido en 1948 por Phil Bull, matemático inglés que acabó convertido en tahúr. El servicio elabora clasificaciones anuales de casi todos los caballos de competición.

Atendimos a las clasificaciones Timeform para todos los caballos con dos años de edad en 1981 y tres en 1982; los clasificamos por su mes de nacimiento. No se observó declive en la clasificación de los caballos nacidos en los primeros cinco meses del año; sí había alguna reducción para los nacidos a final de mayo y junio. De todo ello se infiere que suele sobreestimarse la influencia de la fecha de nacimiento sobre el rendimiento.



4. LOS RECORDS DE TIEMPO no mejoran de manera persistente en todas las carreras del pura sangre. En las pruebas clásicas de larga distancia británicas (St. Leger, Oaks y Derby) y en la norteamericana Belmont, el tiempo medio invertido en la victoria no cae mucho, si es que baja. Los récords de carreras más cortas (Kentucky y Preakness) sí rebajan todavía el tiempo tardado.

La selección global y los procesos de cría en el pura sangre se basan en la creencia de que se hereda el rendimiento en la carrera. Charles Darwin y Francis Galton, entre otros, se propusieron en algún momento abordar, de forma sistemática, la genética de los rendimientos. Pero hasta las últimas décadas no comenzaron a obtenerse estimaciones fiables sobre la heredabilidad del rendimiento.

En esa línea de trabajo, mis colegas y yo hemos realizado algunos análisis importantes de datos del Timeform, el más reciente de los cuales incluye registros de 31.263 animales de 3 años de edad que corrieron entre 1961 y 1985. ¿Presentaban, los grupos de medio hermanos o medio hermanas, una clasificación más parecida entre sí que la recreada con grupos tomados al azar? ¿Hasta qué punto el parecido de las clasificaciones entre padre y descendientes es mayor que la semejanza obtenida entre pares de individuos elegidos al azar y extraídos de dos generaciones?

Los cálculos más ajustados nos dan un rendimiento en pista, según datos de la clasificación Timeform, que es heredable en un 35%. Dicho de otro modo, un 35% de la variación total que observamos en los rendimientos en pista está controlado por factores genéticos; el 65% restante obedece a otras influencias: entrenamiento o nutrición, por ejemplo. Si una yegua y un semental quedan clasificados un 10% por encima de la media de la población, cabe esperar que los descendientes de esa pareja ocupen un lugar más alto en la tabla, un 3,5% sobre la media. Sin olvidar, en cualquier caso, que no existe correlación lineal entre la clasificación del handicap del caballo y su velocidad real.

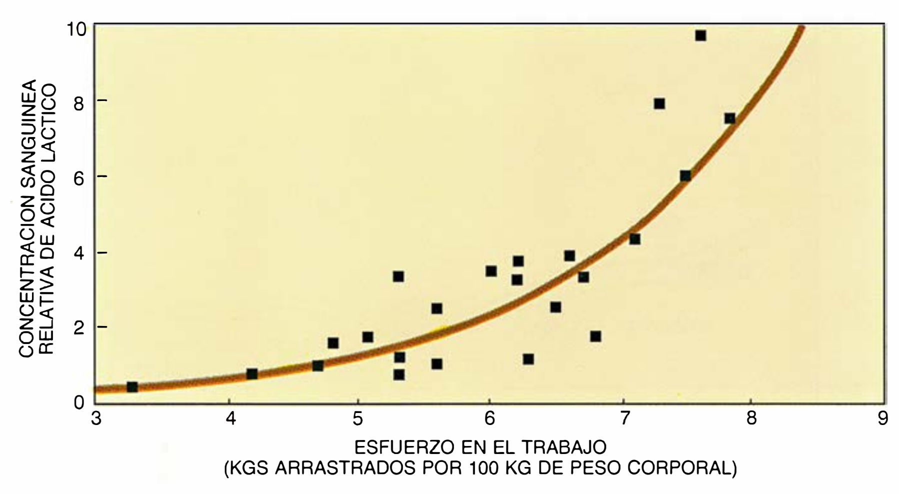
Sabida la heredabilidad del rendimiento, me propuse estimar, con Barry Gaffney, del Trinity, hasta dónde debería progresarse en el rendimiento del pura sangre, en el supuesto de que los caballos que ofrecían los mejores registros en pista eran los favorecidos para la reproducción. El intervalo medio entre generaciones del pura sangre es de unos 11 años. Aproximadamente el 6% de los potros y el 53% de las potras se seleccionan para la reproducción. Conjugando esta información con la heredabilidad del rendimiento, calculamos que, en promedio, la mejora genética del pura sangre aumentaría la media de la clasificación del Timeform en 0,92 centésimas por año.

Pasamos luego a verficar la hipótesis. ¿Se producían los cambios genéticos en la población de pura sangre al ritmo previsto? Analizamos 11.328 clasificaciones Timeform para pura sangre de 3 años de edad y estimamos el mérito que correspondía al componente genético en sementales nacidos entre 1952 y 1977. Nuestro análisis demostró que, aunque el valor genético medio varió algo de un año a otro (lo que era de esperar), había una tendencia persistente a elevarse con un promedio de 0,94 centésimas Timeform por año. Esta cifra se acercaba bastante a la predicción y confirmaba nuestra idea de que la selección mejora sin cesar el rendimiento medio de la población en las carreras.

Ahora bien, contradice de plano nuestra conclusión un hecho innegable: los pura sangre actuales no superan los tiempos de sus antepasados en las carreras clásicas inglesas. Si está teniendo lugar una mejora genética constante, ¿por qué permanencen inamovibles los tiempos?

Podríamos escapar de la contradicción apelando a la existencia de techo o límite fisiológico para el rendimiento, que le impide progresar. La explicación no carece de base; aunque es evidente una meseta en el rendimiento en la St. Leger y en otras carreras de larga distancia, los récords están continuamente mejorando en las más cortas, como ocurre en la Kentucky Derby y otras parecidas.

Richard L. Willham y sus colegas,



5. EL ACIDO LACTICO, un producto de desecho de las contracciones musculares anaeróbicas, se acumula más deprisa conforme el caballo acelera su esfuerzo. La incapacidad de eliminar el ácido láctico durante las carreras clásicas de larga distancia podría ser la razón para explicar la meseta que se observa en la curva de récords temporales.

de la Universidad estatal de Iowa, han hallado pruebas del progreso que, gracias a la reproducción selectiva, se sigue operando en el rendimiento de los caballos de cuarto de milla. Son caballos que compiten en distancias cortas, unos 320 metros (alrededor de 0,2 millas). Después de analizar más de un millón de registros de tiempo de recorrido, el grupo de Willham estimó la evolución de los genes, en la población de caballos del cuarto de milla, entre 1960 y 1983. Se observó una mejora, en la media anual, de 0,47%, 0,43% y 0,16% en los tiempos de realización de las carreras de 320, 366 y 402 metros de distancia, respectivamente. La evolución genética podría explicar un tercio de la mejora en los tiempos.

La discrepancia entre las mejoras en las carreras de los caballos de cuarto de milla y las de los caballos de carreras clásicas podría tener sentido si, más allá de cierto umbral de esfuerzo, el rendimiento encontrara un freno fisiológico.

Los dos factores limitantes más probables se refieren a la circulación sanguínea y al metabolismo del músculo. El primero es el de la aportación sanguínea de oxígeno a los músculos para la síntesis de adenosín trifosfato (ATP), el combustible molecular que suministra la energía para la contracción muscular. El segundo factor concierne a la tasa de eliminación muscular de ácido láctico, subproducto éste del metabolismo anaeróbico (en ausencia de oxígeno) del glucógeno, un carbohidrato rico en energía que proporciona una segunda fuente de ATP. Si el ácido láctico se acumula, el músculo pierde capacidad para sacar anaeróbicamente energía.

En las carreras, el caballo recurre a la contracción muscular aeróbica y a la anaeróbica. Aunque el aflujo de sangre a los músculos aumente drásticamente durante el ejercicio, el esfuerzo máximo del caballo no puede subsistir sólo con la contracción aeróbica. De modo similar, cuando se agotan las reservas de glucógeno en músculos e hígado, se frena la actividad que descansa en la contracción anaeróbica. El balance de las contribuciones aeróbicas y anaeróbicas a la actividad muscular depende de muchas variables, pero especialmente de la cantidad de actividad empeñada, es decir, de la longitud de la carrera.

Las competiciones de velocidad, de 20 segundos de duración, como las carreras donde interviene el caballo de cuarto de milla norteamericano, son principalmente aeróbicas. Los dos minutos y medio requeridos para correr las clásicas inglesas, por el contrario, desplazan el equilibrio energético, en el sentido de que la mayor contribución es de origen anaeróbico. Diferencia que podría explicar, en parte, por qué el cronómetro de las carreras más largas parece estabilizarse en una meseta, mientras que continúan cayendo los récords en las competiciones cortas de velocidad ("sprints").

La fisiología de la circulación sanguínea y del ejercicio en los caballos fue estudiada por G. Frederick Fregin y D. Paul Thomas, en la Universidad de Pennsylvania. A medida que el animal intensificaba su ejercicio, el ritmo cardíaco se elevaba de las 40 pulsaciones por minuto en reposo a una tasa máxima próxima a 200. Al propio tiempo, el volumen de sangre bombeada por el corazón en cada latido aumentaba linealmente. Corriendo a todo galope, un caballo de 500 kilogramos bombea 250 litros de sangre a través de su sistema circulatorio por minuto, lo que equivale a 10 veces su volumen sanguíneo total. No es probable que se limite su rendimiento por falta de oxígeno, porque la circulación sanguínea y la liberación de oxígeno suben linealmente con el ejercicio.

El cuadro cambia de repente en lo relativo a los niveles en sangre de ácido láctico, para un esfuerzo similar. Fregin y Thomas demostraron que la eliminación de ácido láctico no iba acompasada con la intensificación del ejercicio: los niveles de ácido láctico sanguíneo crecían mucho más deprisa. En el momento del esfuerzo máximo del animal, la eliminación de ácido láctico del cuerpo se retrasa peligrosamente. De acuerdo con esa observación, el factor limitante del rendimiento en la competición podría recaer en la acumulación de ácido láctico en los músculos.

Aun cuando aceptemos la realidad de ese techo fisiológico, habrá que reconocer la posibilidad de progresar. Entre los atletas se han generalizado ya los ejercicios de entrenamiento para modificar las tasas de eliminación del ácido láctico. Métodos que podrían extender su aplicación a los caballos. Podríase incluso presionar la selección hacia una mayor eficacia en el metabolismo del ácido láctico. En los caballos, un proyecto así debería mirar muy lejos, aunque podría comenzarse por ensayar su viabilidad en experimentos de selección con ratones.

El hombre ha domesticado una docena, más o menos, de las 4000 especies de mamífero que viven en la actualidad. Durante siglos y fuera del Trópico, el caballo fue quizá su ayuda principal en el trabajo y el transporte. Esas tareas han desaparecido casi. Pero la población continúa creciendo en muchos países al generalizarse los deportes donde intervienen. La cría y las competiciones de los pura sangre constituyen el contexto casi exclusivo en que animal y hombre se implican.

Comparados con otras especies domésticas, los caballos, y los pura sangre en particular, han quedado a extramuros de la ciencia. Con la evidente excepción de la veterinaria: los propietarios de los ejemplares caros buscan que la prevención, el diagnóstico y el tratamiento de las enfermedades se hallen en manos expertas. En otros aspectos, el mundo del caballo tiene pocos incentivos y sí motivos de desaliento ante posibles métodos científicos a adoptar.

La mejora genética en las poblaciones de vacuno y de porcino han conocido un espectacular desarrollo merced a las técnicas de inseminación artificial y de transferencia de embriones, que permiten optar por los machos y las hembras que rendirán más desde el punto de vista reproductor. Las autoridades que entienden en la regulación de la cabaña del pura sangre no prohíben que se recurra a esos métodos.

Nadie muestra especial interés en recortar los tiempos medios de las competiciones porque las ventajas que ello conllevara favorecerían a los propietarios de los caballos más rápidos. ¿Qué importancia tiene que todos los caballos aumenten su celeridad en un 10%? Además, la introducción de estas técnicas alteraría radicalmente el lucrativo negocio de los ganaderos; bastaría, por ejemplo, con muy pocos sementales. No sería bienvenida la repercusión económica que tendría tal hecho.

A pesar de todo, los métodos científicos pueden prestar su ayuda a la cría del pura sangre. Los ganaderos se beneficiarían de los procedimientos más eficientes, ya en uso con otras especies, para ponderar la calidad de los reproductores. El incremento de la fertilidad de las yeguas sería también bueno para todos. Este objetivo es el más fácil de conseguir: basta con modificar las normas sobre cruzamientos. Con las nuevas técnicas de ADN se agilizan las comprobaciones de parentesco entre los pura sangre, lo que redundaría en una selección asistida hacia la velocidad y otros caracteres deseados. Todos estos cambios beneficiosos son posibles sin acabar con la inseguridad, de base biológica, que envuelve a las carreras de caballos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AN INTRODUCTION TO THE THOROUGHBRED. Peter Willett. London, Stanley Paul, 1977.

CARDIOVASCULAR RESPONSE TO EXERCISE IN THE HORSE: A REVIEW. G. F. Fregin y D. P. Thomas en *Equine Exercise Physiology*. Dirigido por D. H. Snow, S.G.B. Persson y R. J. Rose. Cambridge, Burlington Press, 1983.

A REVIEW OF THE INHERITANCE OF RACING PERFORMANCE IN HORSES. E. A. Tolley, D. R. Notter y T. J. Marlowe en *Animal Breeding Abstracts*, vol. 53, n.º 3, págs. 163-185; marzo de 1985.

ESTIMATION OF GENETIC TREND IN RACING PERFORMANCE OF THOROUGHBRED HORSES. B. Gaffney y E. P. Cunningham en *Nature*, vol. 322, n.º 6166, págs. 722-724; 21 de abril de 1988.

Ingeniería mecánica del Islam medieval

Los ingenieros musulmanes de Bagdad conservaron la tecnología precedente y la perfeccionaron con nuevos inventos: la cigüeña, el molino de viento o la bomba de aspiración. Así se anticiparon al despertar de Europa

Donald R. Hill

El mundo occidental acostumbra atribuir su propio progreso intelectual a un cúmulo de factores internos. Desde esa óptica se rastrea el origen de nuestra herencia retrocediendo de la revolución industrial a la Ilustración, de ésta al Renacimiento, se sigue a través de los monjes de la Edad Media, hasta llegar a la fuente: Grecia, Roma y los imperios antiguos del Creciente Fértil.

Pero ese cuadro resulta incompleto. Ignora la intervención de otras civilizaciones, verbigracia, la cristiana griega (Bizancio), la India hinduista, la China confuncionista y el Islam. Nos ocuparemos de la tecnología del Islam medieval, de los conocimientos que conservó, las nuevas ideas con que contribuyó al mundo del Medievo y los inventos mediante los cuales anticipó progresos muy posteriores.

Cuando el profeta Mahoma murió en el año 632 d.C., dejó tras de sí una nueva religión, con su centro administrativo situado en Medina y su corazón espiritual en La Meca. Aproximadamente un año después de su muerte, el resto de Arabia se había incorporado al movimiento musulmán; hacia el 750 d.C., el Imperio Arabe se extendía desde los Pirineos hasta el Asia Central.

Aunque la llegada del Islam indujo profundos cambios políticos, religiosos y culturales, apenas si se resintió la tradición tecnológica. En el campo de la ingeniería mecánica, los musulmanes adaptaron las técnicas de civilizaciones anteriores a las necesidades de la nueva sociedad. Dichas necesidades se centraban en una vida urbana más generalizada, como nunca se había conocido desde los tiempos de Roma.

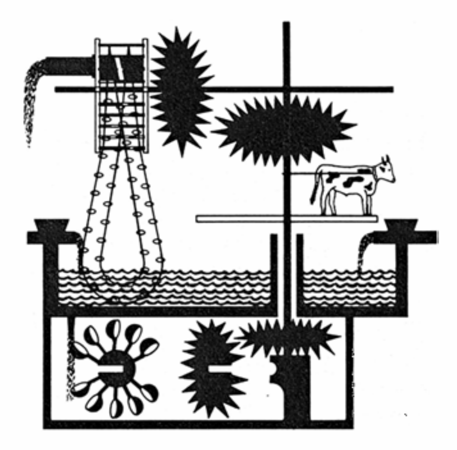
Se estima que Bagdad alcanzó el millón y medio de habitantes en el siglo X. Córdoba, El Cairo y Samarkanda, aunque menores, alcanzaban también un tamaño considerable. París, en cambio, no llegó a contar con 100.000 almas hasta 400 años más tarde. Alimentar y vestir a los habitantes de esas ciudades representaba una gran demanda para la agricultura y las redes de distribución. Estas, a su vez, dependían de la tecnología para aportar suficiente agua de riego a los campos y transformar las cosechas en alimentos.

Empezaremos, pues, por el agua y la energía hidráulica. Abordaremos luego los molinos de agua y de viento. Por último, describiremos una serie de artilugios, la mayoría de ellos extraídos de un puñado de tratados que han llegado hasta nosotros: relojes, fuentes y autómatas diversos, algunos de los cuales podrían parecer triviales a los ojos del hombre de la calle. Pero en ellos se aplican ya conceptos, componentes y técnicas que no entraron a formar parte del arsenal de la ingeniería europea hasta el Renacimiento.

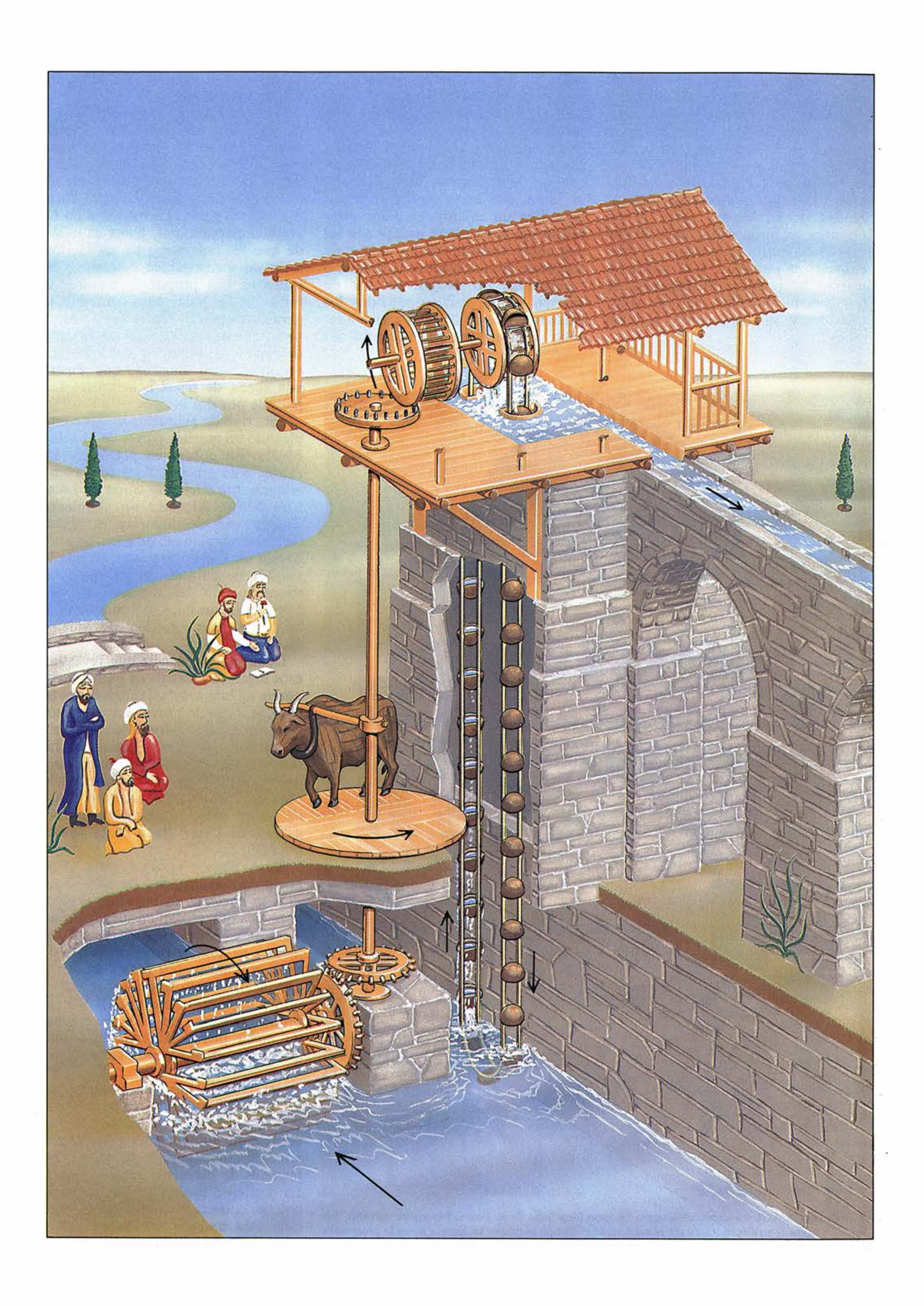
La máquina izadora de agua más antigua es el "shaduf", una especie de palanca con contrapeso mediante la cual se puede suspender e introducir un recipiente en un pozo o un curso fluvial. El ingenio aparece ya en ilustraciones que datan del 2500 a.C., en relieves acádicos; se sigue empleando todavía en algunos lugares de Oriente Medio. Otras máquinas elevadoras tradicionales, introducidas entre los siglos III y I a.C., son el tornillo o caracol de agua, cuya invención se atribuye al famoso matemático Arquímedes. Consta de una hoja helicoidal de madera que gira en el interior de un cilindro, también de madera. Aunque el artilugio no podía izar agua por pendientes de más de 30 grados, operaba en inclinaciones de 20 grados.

Se consiguió un mayor poder ascensional mediante la noria, una rueda de grandes dimensiones movida por el impulso de la corriente. En el borde de dicha rueda se ajusta una se-

DONALD R. HILL, ingeniero retirado, empezó a interesarse por la cultura árabe mientras servía en el Octavo Ejército Británico, que operó en el norte de Africa durante la segunda guerra mundial. Tras el final de la guerra, trabajó para la compañía Iraq Petroleum, trasladándose más tarde a Inglaterra, contratado por la Imperial Chemical Industries. Posee un doctorado por la Escuela Superior de Estudios Orientales y Africanos, dependiente de la Universidad de Londres. Su traducción del libro de al-Jazari sobre máquinas se ha convertido en pieza clásica.



1. GUIRNALDA DE CAZOS, o *saqiya*, para izar agua destinada al consumo humano y animal. Aunque da la impresión de que es el buey quien mueve la saqiya, la verdad es que ésta obedece al impulso de una rueda hidráulica oculta. El dibujo de la página de la derecha está basado en el realizado (*arriba*) por al-Jazari, ingeniero iraquí de finales del siglo XII.



rie de recipientes entre otra serie de paletas que se sumerge en el agua y proporciona la energía de propulsión. El agua se saca de la corriente en los recipientes y se descarga en un depósito central o un conducto situado en lo alto de la rueda. Se construían norias bastante grandes: las famosas ruedas de El Hama, sobre el río Orontes, en Siria, miden unos 20 metros de diámetro. La noria es, por decirlo así, automática, y su funcionamiento no requiere la presencia de hombres ni animales. Pero su construcción y mantenimiento resultan caros.

La "saqiya" es, probablemente, el más extendido y útil de todos los ingenios hidráulicos heredados y mejorados por el Islam medieval. Se trata de una cadena de vasijas movida por uno o dos animales mediante un par de engranajes. Los animales arrastran una barra de tiro mientras describen un círculo, haciendo girar así un eje cuyo piñón encaja con un engranaje vertical. Dicho engranaje transmite la acción sobre la cadena o "guirnalda" de vasijas: un par de cuerdas donde van suspendidos los cazos o vasijas de barro. La saqiya resulta idónea para sacar cantidades moderadas de agua desde pozos relativamente hondos.

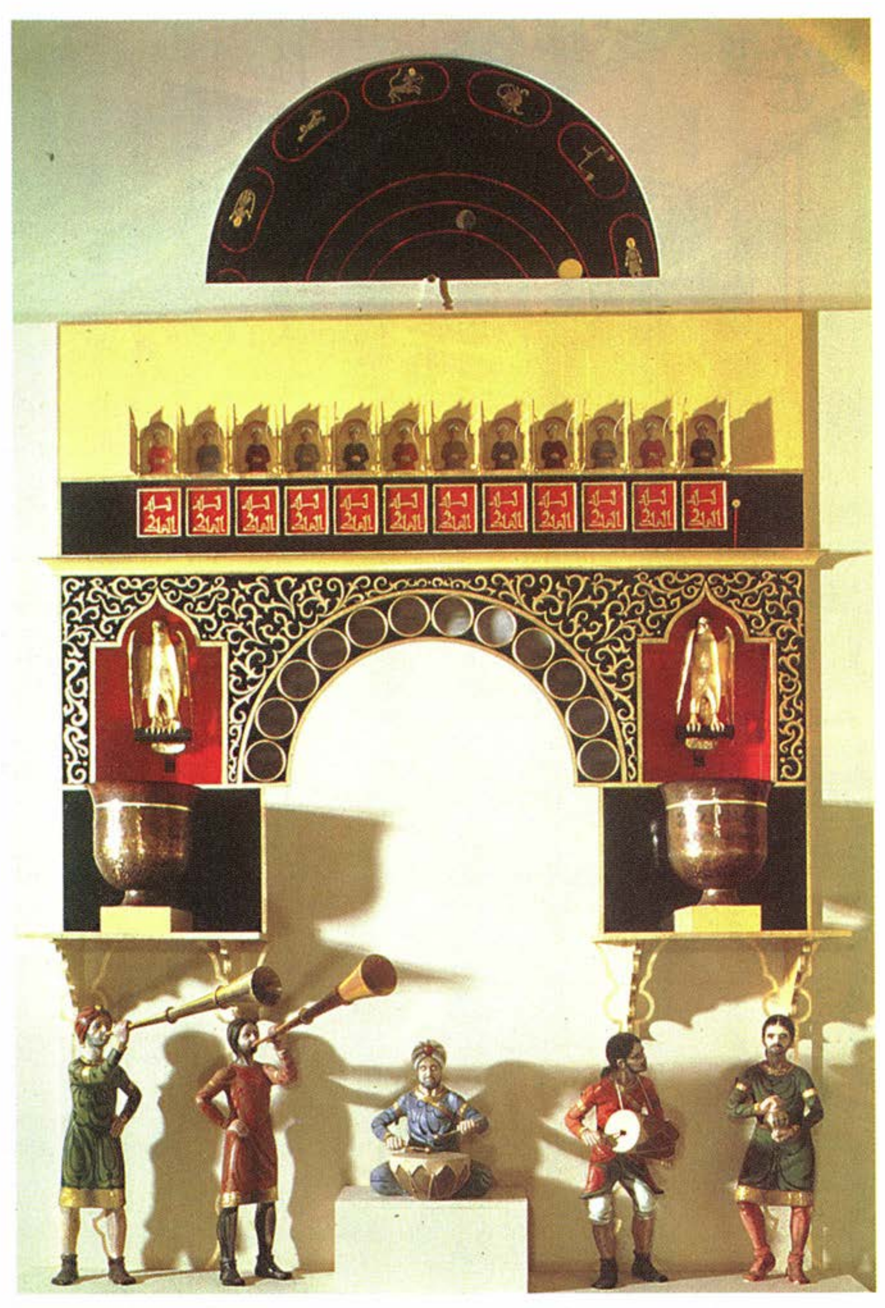
Para izar agua en mayor volumen y de pozos más someros se necesitaban otros ingenios. El problema se solucionó con la rueda de paletas helicoidales, que obtiene buen rendimiento en su capacidad de elevar agua hasta el nivel del suelo. La máquina no ha perdido popularidad, hasta el punto de que los ingenieros de un laboratorio de investigación cercano a El Cairo se han propuesto mejorar la forma de las palas para conseguir la máxima potencia. No es de extrañar, pues, que nos parezca un diseño modernísimo la miniatura del siglo XII, encontrada en Bagdad, que ilustra una rueda de palas helicoidales impulsada por dos bueyes.

Este tipo de máquinas se sigue empleando en muchos países de Oriente Medio (los pobres en petróleo). La razón: para muchos fines son, como mínimo, tan eficientes como las bombas diesel; además, no requieren combustibles de importación, piezas de recambio ni mano de obra. Se ahorra así un tiempo precioso, ya que la pérdida de un solo día de funcionamiento puede dar al traste con una cosecha, lo que hace, del cumplimiento fiable, una cuestión de vida o muerte.

Dada la importancia que revestían esos ingenios hidráulicos para la economía de la mayoría de sociedades islámicas, eran de prever los esfuerzos por introducir nuevos diseños o modificar los existentes. Algunas de las innovaciones más interesantes se pueden encontrar en una sección de la obra de Ibn al-Razzaz al-Jazari *Libro del saber sobre ingenios mecánicos*, escrito en Diyar Bakr (Alta Mesopotamia) en 1206.

Desde nuestro punto de vista, el aspecto más significativo de estos ingenios se encierra en las ideas y componentes que entran en juego. En un caso, por ejemplo, su diseño se ordena a eliminar los desequilibrios de carga y realizar, por tanto, una operación más uniforme. Otros incorporan cigüeñas (manivelas): son el primer ejemplo de uso no manual de dicha pieza. Algunas máquinas constituían meras curiosidades.

Sin duda alguna, el invento que ofrecía mayor interés para el desarrollo del diseño mecánico era la bomba de doble cilindro impulsada por agua, una máquina útil para prestaciones de elevación muy potentes. La corriente hacía girar la rueda de paletas conectada a una rueda dentada; ésta, a su vez, encajaba con otra rueda dentada horizontal, instalada



2. RELOJ DE AGUA reconstruido según las especificaciones de al-Jazari. Incorpora válvulas "en línea" y otros controles hidráulicos. El reloj mide el tiempo lo mismo en horas que en la progresión estacional de los signos del Zodíaco. (Maqueta realizada por Peter N. Hayward.)

sobre un colector que drenaba la corriente. Sobre la rueda horizontal se había practicado una ranura hasta cerca de su perímetro y en el interior de ésta se enclavijaba un perno vertical.

La rueda giratoria movía dos vástagos en vaivén, impulsando así dos pistones enfrentados. Cada pistón constaba de dos discos de cobre separados por un hiato intermedio de unos seis centímetros, que se rellenaba de cáñamo. Los pistones se introducían en sendos cilindros; cada cilindro estaba conectado a una tubería de aspiración y otra de descarga. Así, mientras uno de los pistones empezaba su carrera de aspiración, el otro iniciaba la suya de descarga. Esta máquina resulta muy interesante por tres razones: incorpora un método efectivo para transformar el movimiento rotatorio en movimiento de vaivén, rentabiliza el principio de doble acción y es la primera bomba conocida con verdaderas tuberías de aspiración.

La energía hidráulica constituía uno de los principales motivos de preocupación de los ingenieros islámicos. Siempre que mencionaban una corriente, arroyo o río, incluían una estimación acerca de cuántos molinos podía abastecer. Diríase que tasaban las corrientes en unidades de "potencia de molino".

Las tres clases principales de rueda hidráulica existían ya desde los tiempos clásicos: la rueda horizontal y dos prototipos de rueda vertical. La horizontal constaba de aspas o paletas que sobresalían de un rotor de madera, sobre el que se proyectaba un chorro de agua. En la Europa moderna se modificó este diseño para su uso con agua que fluía en dirección axial (como el aire a través de un molinillo de juguete). Así se creó la turbina de agua. Resulta interesante ver cómo en un tratado árabe del siglo IX aparecen ya descritas algunas ruedas con paletas curvas, sobre las cuales el flujo incidía en dirección axial.

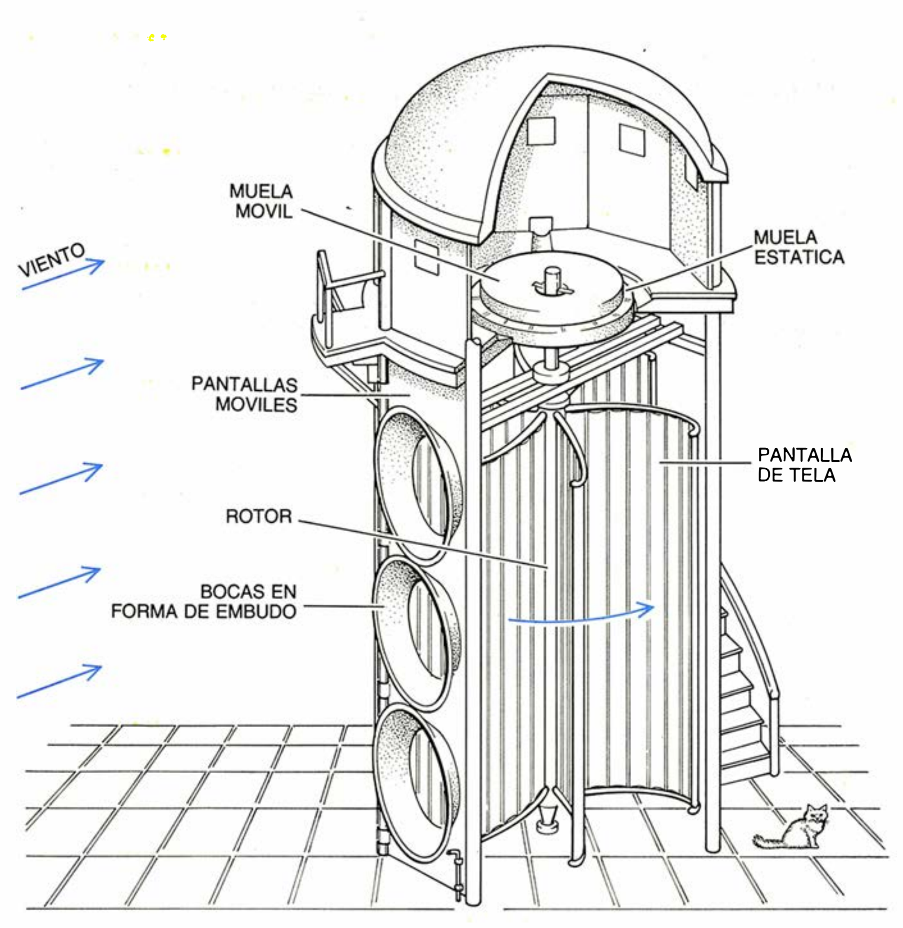
Las ruedas verticales, más potentes, se presentaban en dos variedades: con impulso por la parte inferior o superior. La primera, una rueda de paletas, gira aprovechando el impulso de la corriente. La rueda con impulso superior recibe el agua por arriba, normalmente a través de canales construidos con ese fin; por lo que, al ímpetu de la corriente, cabe añadir el de la gravedad.

Durante la estación seca, cuando menguan los niveles y caudales de los ríos, las ruedas con impulso inferior pierden parte de su potencia. Y, si la rueda está instalada sobre la orilla del río, sus paletas corren el peligro de dejar de sumergirse. Para evitar el problema, podía montarse la rueda sobre el pilar de un puente, aprovechando el ligero aumento de caudal en la zona. También se recurrió a los "molinos-barco", movidos por ruedas de impulso inferior montadas en los lados de un barco anclado en el centro de la corriente. En el siglo X, sobre los ríos Tigris y Eufrates, en la Alta Mesopotamia (granero de Bagdad), había enormes molinos-barco hechos de hierro y madera de teca que producían hasta 10 toneladas de harina de trigo por día.

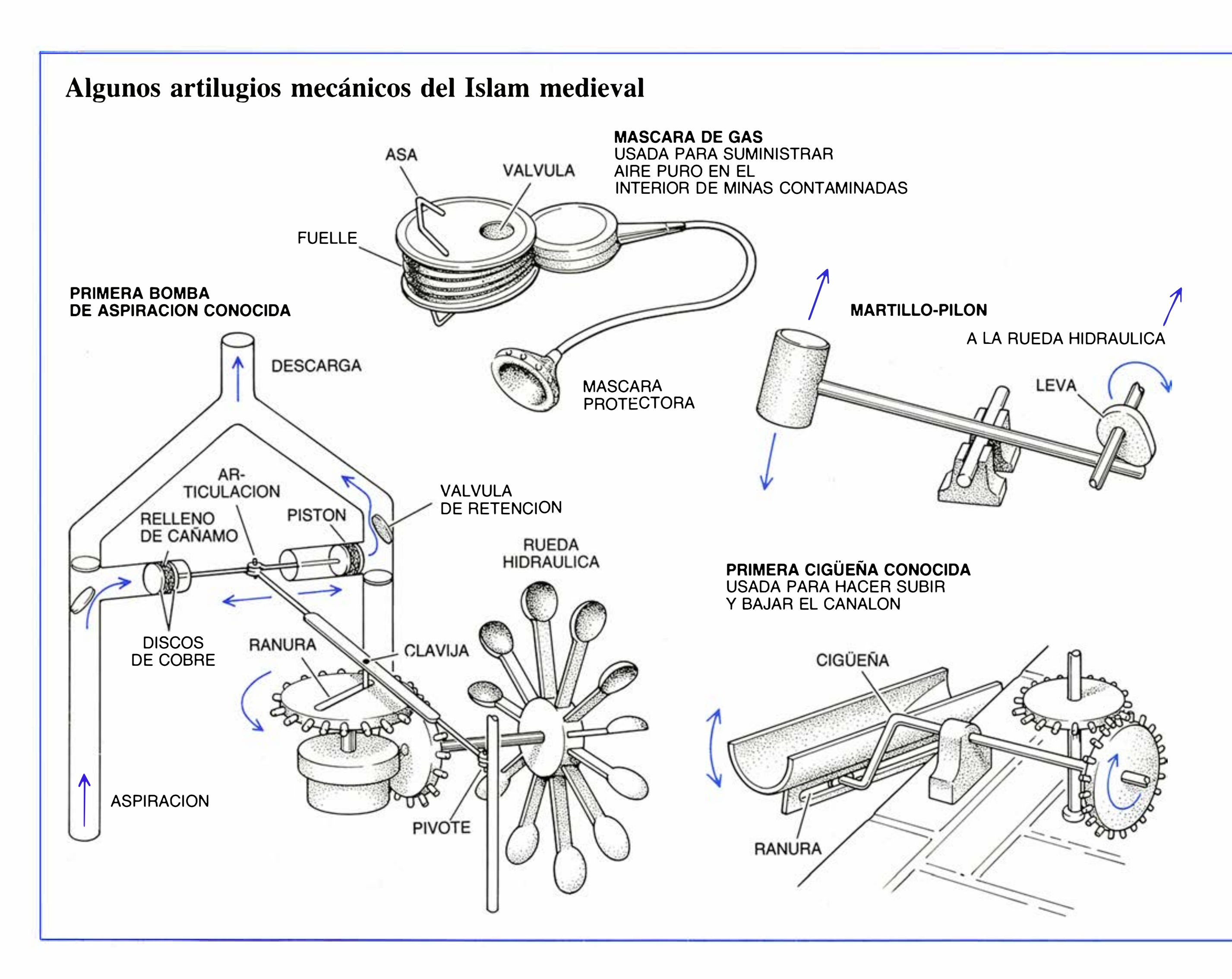
La molienda del trigo y otros granos representaba, casi siempre, la principal tarea de los molinos. Pero se les aprovechaba también para otros usos industriales; entre ellas, el abatanado de telas, el machacado de menas metálicas anterior al proceso de extracción, el descascarillado del arroz, la fabricación de papel o la obtención de la pulpa de la caña de azúcar. El método habitual para adaptar las ruedas hidráulicas a esos fines consistía en alargar el eje y ajustar toda una serie de levas sobre el mismo. Dichas levas elevaban y dejaban caer martillos del martinete sobre el material en cuestión.

Allí donde la energía hidráulica escaseaba, los musulmanes tuvieron que recurrir al viento. En el Seistán, parte occidental del actual Afganistán, que se caracteriza por la falta de ríos, se erigieron los primeros molinos de viento, probablemente a principios del siglo VII. Los molinos se sustentaban sobre estructuras especialmente construidas, sobre la torre de un castillo o la cima de un monte. Constaban de una cámara superior para las muelas y otra inferior para el rotor. Un eje vertical transportaba seis o doce palas rotatorias, cada una cubierta con una doble capa de tela. Una serie de bocas en forma de embudo atravesaba la pared de la cámara inferior, con su parte más estrecha orientada hacia el interior para aumentar la velocidad del viento cuando éste soplaba contra las velas.

Este tipo de molino conoció una rápida difusión por todo el mundo islámico, China e India incluidas. En el Egipto medieval se usaba en la industria de la caña de azúcar, pero su aplicación fundamental seguía siendo la molienda de grano.



3. EL PRIMER MOLINO DE VIENTO se construyó en el siglo VII, en Afganistán, donde había escasez de energía hidráulica. El rotor giraba en torno a un eje vertical, diseño que se extendió por gran parte de Asia. Los musulmanes nunca adoptaron el molino de viento europeo, con su eje horizontal, a pesar de que los cruzados erigieron tales molinos en sus castillos.



Ocupémonos ahora de un tipo de ingeniería que difiere bastante de la tecnología de equipo o infraestructura descrita hasta ahora. Podríamos llamarla "tecnología fina", ya que los rasgos que la distinguen derivan del uso de delicados mecanismos y controles.

Algunos cumplían una función práctica: los relojes de agua se utilizaban en observaciones astronómicas y se erigían en lugares públicos; los instrumentos astronómicos servían de ayuda tanto en la observación como en los cálculos. Otros eran objetos decorativos o de diversión para los miembros de los círculos elegantes de las cortes. Los había con indudables fines didácticos; por ejemplo, para demostrar los principios de la pneumática tal como se entendían en la época. Salvo algunos instrumentos astronómicos y los restos de dos grandes relojes de agua en Fez (Marruecos), ninguno de estos artilugios ha sobrevivido hasta nuestros días. Lo que conocemos sobre ellos lo hemos sacado, casi exclusivamente, de dos tratados árabes que han llegado hasta nosotros.

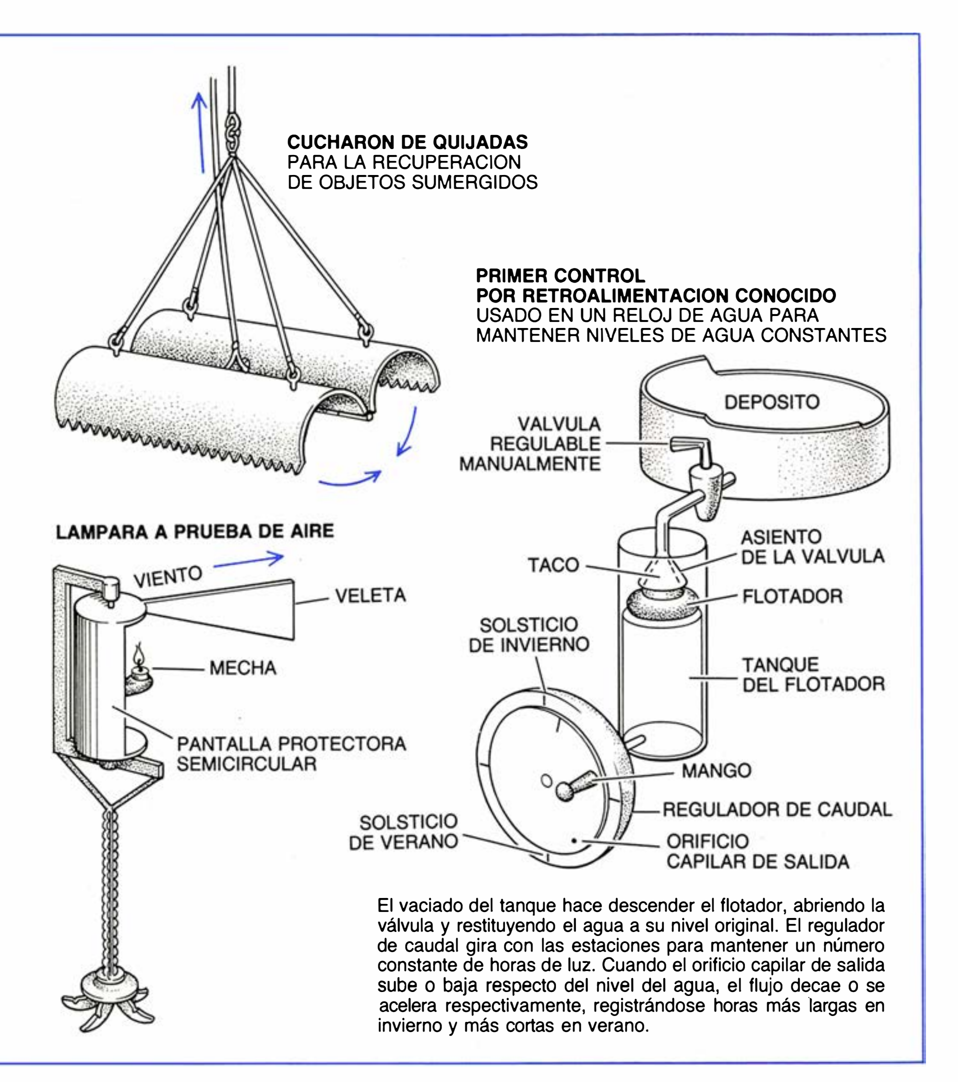
El primero fue escrito por los Banu (en árabe "hijos de") Musa, tres hermanos que vivieron en Bagdad en el siglo IX. Sufragaron el trabajo de literatos y traductores, además de ser, ellos mismos, eminentes científicos e ingenieros. Acometieron la realización de obras públicas y estudios geodésicos, y escribieron bastantes libros sobre temas matemáticos y científicos. Sólo tres nos han llegado.

Aquí nos interesa el *Libro sobre ingenios mecánicos*. Describe un centenar de aparatos, con su figura correspondiente. Ochenta de ellos son verdaderos "recipientes mágicos" de varias clases. Encontramos también fuentes que cambian de forma a intervalos definidos, una lámpara a prueba de vientos, lámparas autorreguladas y autoalimentadas, una máscara de gas para pozos contaminados o una draga para recuperar objetos hundidos en un río. Esta última tiene la misma estructura que un cucharón de quijadas actual.

Los "recipientes mágicos" de que hablábamos antes exhibían unos efectos muy ingeniosos; por ejemplo, había uno que vertía de un tonel y con un solo caño primero vino, luego agua y finalmente una mezcla de ambos. Aunque los resultados no constituyen ningún hito en la historia de la ingeniería, sí merecen nuestra atención los medios a través de los cuales llegaron a ellos. Los Banu Musa eran maestros en sacar partido de las mínimas variaciones de presión aerostática o hidrostática y en el empleo de válvulas cónicas como componentes "en línea" de sistemas de flujo, primer uso conocido de dichas válvulas como controladores automáticos.

Algunos de estos "recipientes mágicos" permitían retirar repetidamente pequeñas cantidades de líquido, pero si se retiraba mucho de una sola vez, no se podían hacer más extracciones. En términos modernos, podríamos decir que el método utilizado para conseguir tal efecto constituye un "sistema a prueba de fallos".

El segundo tratado de importancia



El vaciado del tanque hace descender el flotador, abriendo la válvula y restituyendo el agua a su nivel original. El regulador de caudal gira con las estaciones para mantener un número constante de horas de luz. Cuando el orificio capilar de salida sube o baja respecto del nivel del agua, el flujo decae o se acelera respectivamente, registrándose horas más largas en invierno y más cortas en verano.

que nos ha llegado lo escribió al-Jazari a finales del siglo XII. Al servicio de los príncipes de Artuqid, vasallos de Saladino (que derrotó a Ricardo Corazón de León durante la Tercera Cruzada), su trabajo le sitúa entre los mejores ingenieros mecánicos anteriores al Renacimiento. Se han reconstruido varias máquinas de al-Jazari siguiendo sus especificaciones, dadas con un detalle insólito; transcurrirán siglos, con leyes de patentes por medio, antes de encontrar minuciosidad semejante.

Todos los relojes de al-Jazari empleaban autómatas para marcar el paso de las horas. Había pajarillos que soltaban, desde el pico, bolitas sobre címbalos, puertas que se abrían descubriendo figuras humanas, círculos zodiacales rotatorios, músicos tocando tambores o trompetas, etc. Por lo común, correspondía a los motores principales del aparato transmitir el movimiento a dichos autómatas mediante sistemas de poleas y mecanismos de trinquete. En su reloj de agua más espectacular, con un cuadrante de unos cuatro metros de altura por uno y medio de anchura, el impulso lo confería el lento descenso de una pesada boya en un depósito circular.

Era forzosamente necesario algún medio para mantener constante el flujo de salida del depósito; y ello se consiguió de manera brillante. Del fondo del depósito salía una tubería de bronce moldeado, dotada de un grifo cuyo extremo había sido curvado en ángulo recto y transformado en el asiento de una válvula cónica. Debajo mismo de esa salida se creó un pequeño tanque cilíndrico, donde oscilaba un flotador con el taco de la válvula en su cara superior.

Cuando se abría el grifo, el agua caía al tanque; el flotador ascendía hasta que el taco encajaba con su asiento. El agua del tanque se descargaba a través de otra tubería situada en su fondo; la válvula se abría transitoriamente y dejaba pasar más agua del depósito hasta que la válvula se volvía a cerrar, etc. Así se lograba mantener un nivel constante en la cámara del flotador mediante control por retroalimentación; y, con ello, la pesada boya situada en el depósito descendía a velocidad constante. Al-Jazari decía que su invento estaba inspirado en una versión más simple que él atribuía a Arquímedes.

Este reloj no registraba horas iguales de 60 minutos cada una, sino horas temporales, es decir, las horas del día o de la noche divididas por 12, que varían con las estaciones. Para esa clase de medición se requería otra pieza en el equipo: un regulador de caudal para la salida de la tubería de descarga del tanque del flotador, un aparato que permitiese que el orificio de salida describiera un círculo completo y modificara así el nivel hidrostático bajo la superficie del agua en el tanque. Los reguladores de caudal precedentes eran bastante imprecisos, pero al-Jazari explica cómo logró calibrar el instrumento por medio de un método tenaz de ensayo y error. Otro tipo de reloj, que bien pudiera ser un invento del propio al-Jazari, incorpora un sistema de bucle cerrado: el reloj funcionaba mientras estuviese cargado con bolas metálicas con las cuales golpear su gong.

Al-Jazari desarrolló relojes de vela. Todos se guiaban por un principio de funcionamiento similar. Cada diseño especificaba un velón de sección transversal uniforme y peso conocido (se daba incluso el peso de la mecha). La vela se instalaba en el interior de una envoltura metálica, a la cual se ajustaba un casquillo plano (torneado). Al casquillo se le había practicado un agujero en el centro y una muesca alrededor del agujero por la cara superior.

La vela, con una velocidad de combustión conocida, presionaba contra la parte inferior del casquillo; la mecha atravesaba el agujero. En la muesca se recolectaba la cera, retirándola periódicamente, para que no entorpeciera la combustión constante. La base de la candela descansaba sobre un plato plano; tenía éste un anillo en su borde, conectado a través de poleas a un contrapeso. Así, a medida que la vela se iba consumiendo, el peso la empujaba hacia arriba a velocidad constante. Los autómatas del reloj se hacían funcionar desde el plato. No se conocen otros relojes de vela tan refinados.

Otros capítulos de la obra de al-Jazari exponen fuentes y autómatas musicales, cuyo interés reside en que, en ellos, el flujo de agua alternaba de un gran depósito a otro a intervalos regulares de media o una hora. Se podía

usar diversos e ingeniosos artilugios para lograr dicha "conmutación" hidráulica. Podemos conocer varios controles mecánicos, incluidos en unos capítulos dedicados a un auténtico popurri de aparatos: una gran puerta metálica, una cerradura con combinación o un cerrojo con cuatro pestillos, entre ellos.

En la obra de al-Jazari se introducen nociones de importancia capital para la ingeniería. Baste citar la laminación de la madera para minimizar su deformación, el balanceo estático de ruedas, el uso de plantillas de madera, las maquetas para la consolidación de diseños, el calibrado de orificios, el pulido de asientos y tacos de válvula con polvo de esmeril para obtener ajustes herméticos y la fundición de metales con arena en molde cerrado.

No se conoce bien de qué modo penetró en Europa la tecnología mecánica del Islam. Nada se opone a que persistieran allí ideas heredadas directamente de la tradición grecorromana. Ni cabe excluir algún caso de reinvención. Pero, con todo y ello, parece verosímil que varios elementos de la rica veta de la ingeniería islámica llegaran a Europa.

La transferencia tecnológica se produjo, seguramente, a través del contacto entre artesanos, por inspecciones de máquinas en funcionamiento o en reparación, o por informes de viajeros. El paso principal para la transmisión de información fue, sin duda, España, durante el largo período de coexistencia entre cristianos y musulmanes.

Queda mucho por avanzar en el tema de la difusión de elementos tecnológicos desde las tierras del Islam hacia Europa, pero ello no debe devaluar en absoluto los logros de los ingenieros musulmanes, famosos o anónimos. Tampoco debemos sobreestimar la relevancia de los inventos islámicos para el desarrollo de la maquinaria moderna. Igual o más importante es su contribución al bienestar material y, por tanto, a la riqueza cultural del Oriente Próximo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ROMAN AND ISLAMIC WATER-LIFTING WHEELS. Thorkild Schiøler. Odense University Press, 1973.

A HISTORY OF ENGINEERING IN CLASSICAL AND MEDIEVAL TIMES. Donald R. Hill. Open Court Publishing Company, 1984.

ISLAMIC TECHNOLOGY: AN ILLUSTRATED HISTORY. Ahmad Y. al-Hassan y Donald R. Hill. UNESCO y Cambridge University Press, 1986.

Astrosismología

Esta nueva ciencia constituye la única herramienta capaz de observar y medir, de modo fiable, la dinámica y estructura interna de las estrellas y su evolución

Juan Antonio Belmonte Avilés, Fernando Pérez Hernández y Teodoro Roca Cortés

Una estrella es como una gigantesca esfera de gas a elevadísimas temperaturas, sometida a la acción de su propia gravedad. Podemos asimilarla también a un instrumento musical que vibra con sus correspondientes propiedades de frecuencia, timbre, tono, etcétera. De la misma forma que los geofísicos tratan de conocer el interior de la Tierra mediante el estudio de los movimientos sísmicos (terremotos) o, mejor, de las ondas asociadas a ellos y su propagación, la astrosismología constituye la rama de la astrofísica que obtiene información acerca de la estructura, dinámica y estado evolutivo de las estrellas mediante el estudio de las oscilaciones que les son propias. Por oscilaciones se entienden los procesos cíclicos de contracción y dilatación de la globalidad o de una parte de la estructura de la estrella.

Estas oscilaciones producirán variaciones en el flujo irradiado por la estrella, en la temperatura superficial de la misma o en ambos; producirán también fluctuaciones en la velocidad de las capas superficiales. Por medio de técnicas fotométricas se observan las variaciones en el brillo o luminosidad de la estrella; a través de técnicas espectrométricas, se aprecian las fluctuaciones en las posiciones relativas de las líneas espectrales debido al efecto Doppler.

JUAN ANTONIO BELMONTE AVILES, FERNANDO PEREZ HERNANDEZ Y TEODORO ROCA CORTES se hallan adscritos al Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Roca comenzó su formación en la Universidad de Barcelona, doctorándose por la de La Laguna en 1979. Catedrático de esta última desde 1987, ha desempeñado el cargo de director de su departamento de astrofísica y el de coordinador de enseñanza del IAC. Pionero en la investigación de heliosismología, sus contribuciones se dirigen, también, hacia la astrosismología. Belmonte es profesor titular interino del departamento de astrofísica de la Universidad de La Laguna. Su labor investigadora se ha centrado, principalmente, en el tema que aborda el presente artículo, la sismología estelar. Pérez es becario posdoctoral en el IAC.

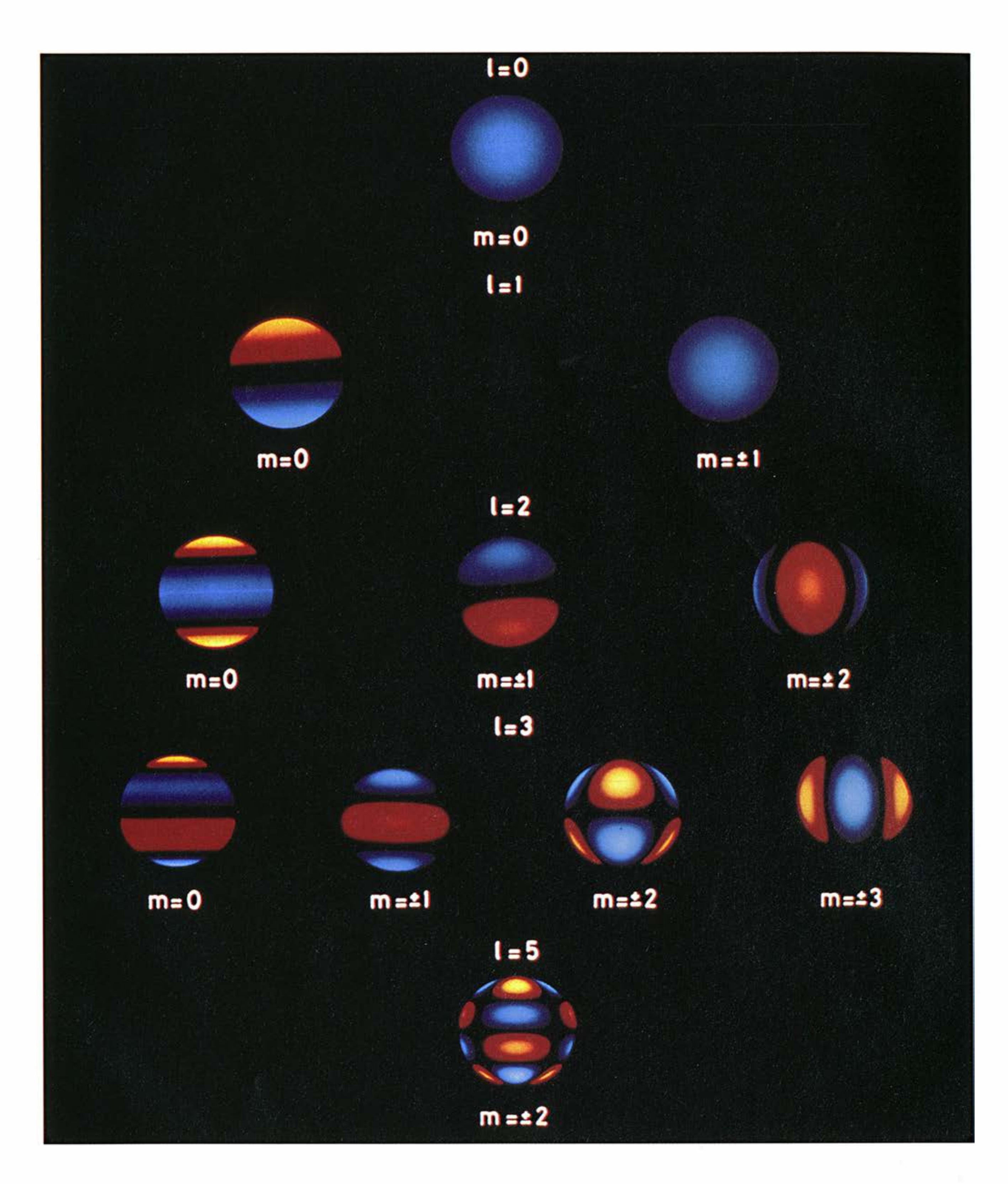
En principio, todo cuanto se conoce de las propiedades de las estrellas se consigue por medio del estudio de la radiación electromagnética que emiten en el rango entero de frecuencias. Sin embargo, debido a la infinidad de absorciones y reemisiones sufridas por los fotones (proceso de termalización), desde que se producen en las reacciones termonucleares ocurridas en la parte más interna de la estrella hasta que alcanzan su superficie, la información que portaban desaparece. Por tanto, esa radiación sólo nos ayuda a conocer la física de las capas más externas de la atmósfera estelar, en particular, su fotosfera, cromosfera y corona. Las técnicas fotométricas y espectroscópicas habituales no son útiles para acceder a la información contenida en el interior de las estrellas. Se ha de recurrir a nuevas técnicas, más refinadas, que, en muchos casos, se encuentran a la vanguardia de la técnica de punta.

El *quid* del problema con el que nos enfrentamos es el siguiente: para describir el estado físico de una estrella cualquiera, se parte de una serie de parámetros observacionales susceptibles de conocerse que, en el mejor de los casos, son su luminosidad (si sabemos la distancia), su masa (si la estrella forma parte de un sistema binario o múltiple) y su radio (que, en muy pocos casos, puede determinarse por técnicas interferométricas).

Con estos parámetros se elaboran modelos teóricos, que proporcionan valores de la densidad, la temperatura, la presión y otras magnitudes físicas, en función del radio; es necesario, además, hacer uso de ciertas hipótesis simplificadoras (sobre fuentes de energía, opacidad, ecuación de estado, composición química, equilibrio térmico, equilibrio hidróstatico, convección, etcétera). De estos modelos sólo pueden comprobarse, por vía observacional, los valores de estas magnitudes en la superficie, cuyo espesor es aproximadamente de un 1 por mil del radio de la estrella. La falta de observaciones del otro 999 por mil con las que contrastar los modelos calculados explica que, hasta fechas muy recientes, no se haya planteado la cuestión de si las hipótesis en que se apoyan dichos modelos son válidas.

Llegados a este punto, podríamos preguntarnos si existen otros parámetros observables que nos puedan proporcionar información acerca de la estructura interna de una estrella. La astrosismología ofrece, hoy por hoy, la única respuesta afirmativa a esta pregunta. Es de sobra conocido que, cuando se excita convenientemente una estructura cualquiera en equilibrio, comunicándole cierta energía, responde a la perturbación realizando pequeñas vibraciones u oscilaciones; las frecuencias de esas vibraciones normales o propias dependen de la naturaleza del objeto excitado. Una estructura simple, un diapasón por ejemplo, si se le golpea, oscila con una sola frecuencia que le es característica y con amplitud proporcional a la energía suministrada.

La frecuencia, la amplitud y la fase son las tres magnitudes que definen una oscilación. Se denomina frecuencia (ν) al número de oscilaciones producidas en la unidad de tiempo; para estrellas, se suele medir en fracciones de hertz (Hz), que es la unidad del sistema métrico; en el caso de las estrellas con períodos más largos, la frecuencia se mide en ciclos por día (d^{-1}) o en ciclos por año (a^{-1}). La amplitud es el máximo valor de la separación de la posición de equilibrio y se puede medir en diversos parámetros físicos (metro/segundo si es en velocidad, magnitudes si es en luminosidad, etcétera). Finalmente, la



1. OSCILACIONES ESTELARES. La superficie de cualquier estrella puede verse perturbada por la acción de los diferentes modos normales de oscilación, que no son más que ondas atrapadas y obligadas a propagarse entre dos capas de la estrella que limitan una zona llamada cavidad resonante. Vienen caracterizados por los valores del orden radial n, del grado l y del índice acimutal m; donde n es el número de ceros de la función radial (número de nodos desde el centro a la superficie de la estrella), l designa el número de ceros de la función angular (líneas nodales) de las coordenadas esféricas asterográficas, con el eje de rotación como eje de simetría, y m es el número de líneas nodales que son meridianos. Dado un modo normal con l fijo, la rotación de la estrella se acopla con él de $2l + 1$ formas distintas, tal como se pone de manifiesto en la ilustración. En ella, el tono azul violáceo representa zonas estelares en expansión; el tono amarillo rojizo, zonas en recesión. En negro figuran las líneas nodales. La mayor intensidad de color azul o amarillo da cuenta de la magnitud de la perturbación en cada zona. Como se puede apreciar, para l mayor que cero se formarán ondas sobre la superficie. A medida que l aumenta, crece el número de valles y crestas de forma que, para $l > 3$, la perturbación en la superficie de una estrella no es observable debido a la ausencia de resolución espacial (objetos puntuales) con la consiguiente cancelación de las perturbaciones positivas (expansión) y negativas (recesión). Para los modos $l = 1$, 2 y 3 $m = \pm 1$, el meridiano visto de frente se corresponde con una línea nodal. En una estrella podemos tener más de un millón de modos de oscilación diferentes.

fase, medida en radianes o en grados, nos proporciona información sobre el estado (contracción o dilatación) en que se encuentra la onda en un instante dado.

Otras estructuras, más complicadas que un simple diapasón (un instrumento musical, las vigas de un edificio, un puente o la carrocería de un vehículo, por poner ejemplos comunes de la vida diaria), oscilan con toda una gama de frecuencias, el denominado espectro de frecuencias propias. La determinación precisa del espectro de frecuencias propias nos proporcionará información sobre la estructura del objeto que oscila.

A una estrella le ocurre como a cualquier instrumento musical. Si se la perturba, responderá oscilando con unas frecuencias que dependerán de su propia estructura física. La propia naturaleza nos proporciona los mecanismos capaces de excitar una estrella, de forma similar a como un arco excita las cuerdas de un violín, aunque a una escala gigantesca (explosiones termonucleares en el núcleo, fulguraciones, convección, meteoritos o cometas que caen sobre la superficie, interacciones gravitatorias por efectos de marea, etc.). Cualquiera que sea el espectro de frecuencias propias de una estrella, si consiguiésemos detectarlo, tendríamos un instrumento muy eficaz en la astrosismología para medir su estructura interna, es decir, para comprobar que las hipótesis sobre su estructura, que se usan en la construcción de modelos, son las correctas.

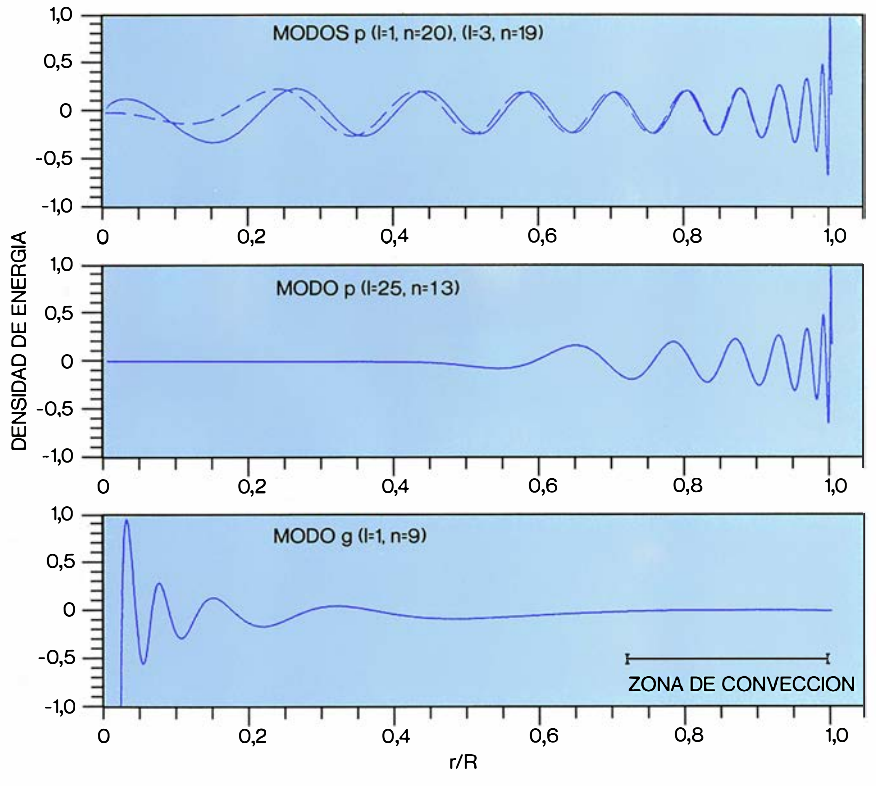
En el caso de una estrella, debido a su geometría esférica, los modos propios de oscilación correspondientes a ondas estacionarias se caracterizan por tres números cuánticos: n, l y m, denominados, respectivamente, orden radial, grado e índice acimutal del modo. El valor de n se corresponde con el número de nodos (regiones que no sufren desplazamiento) en la dirección radial, desde el centro hasta la superficie de la estrella; l designa el número de nodos sobre la superficie esférica y m, el número de nodos sobre el ecuador. En una estructura esférica dotada de perfecta simetría no es posible definir un ecuador; si bien la rotación provoca que todos los modos con igual n y l se desdoblen en $2l + 1$ frecuencias nuevas, según sea el valor de m, desdoblamiento que es proporcional a la velocidad angular de rotación en la cavidad donde se propaga el modo. De lo cual se infiere que la medida del desdoblamiento rotacional indica la velocidad de rotación del interior de la estrella.

Por culpa de la gran distancia a que se encuentran las estrellas, éstas se observan como objetos puntuales incluso con los mayores telescopios, lo que redunda en ausencia de resolución espacial. Ese hecho provoca la mutua cancelación de las perturbaciones positivas (dilatación) y negativas (contracción), por lo que, en el mejor de los casos, el máximo grado observable será el $l = 3$, en contraposición al Sol, donde, gracias a su proximidad, son observables modos con grados mucho mayores [véase "Oscilaciones solares", por Teodoro Roca, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1982].

Los modos propios de oscilación de una estrella se pueden clasificar en virtud de la fuerza restauradora del equilibrio. Si ésta es el gradiente de presiones, entonces hablaremos de modos acústicos, también llamados modos p, que son de la misma naturaleza que los que se producen en los instrumentos musicales de viento. Si la fuerza restauradora es el empuje de Arquímedes, entonces tendremos los llamados modos gravitatorios o modos g, ejemplo de los cuales son los que se producen en los mares y océanos de la Tierra por la acción de los vientos.

Los modos p se caracterizan porque sus frecuencias se hallan comprendidas entre la frecuencia acústica de corte, más allá de la cual no se reflejarían en la superficie y se disiparían en la atmósfera, y la frecuencia de empuje o de Brunt-Vaisala, que es la máxima con la que una burbuja de gas oscila adiabáticamente (es decir, sin intercambio de calor) en el interior de la estrella. Los modos p aumentan su frecuencia con n y l y se propagan casi verticalmente en la dirección radial de la estrella. Conforme aumenta el grado l, para un mismo orden radial n, los modos se ven confinados a oscilar en capas cada vez más externas de la estrella.

Por el contrario, los modos g vibran



2. MODOS DE OSCILACION. Identificados por sus valores de n, l y m, se dividen además en varios tipos según sea la fuerza restauradora del equilibrio. Los modos en que dicha fuerza es el gradiente de presiones se denominan modos acústicos o modos p. Si la fuerza restauradora es el empuje, entonces hablaremos de modos gravitatorios o modos g. En las estrellas se suele dar una mezcla de ellos, con la presencia de modos g y p más o menos puros y de modos mixtos. La figura nos presenta, para una estrella de una masa solar, la densidad de energía en unidades arbitrarias, en función de la fracción de radio de la estrella, asociada a cuatro modos de oscilación distintos: dos modos p de frecuencias parecidas pero que difieren en 1 en el valor de n y en 2 en el de l ($l = 1$ $n = 20$, trazo continuo; $l = 3$ $n = 19$ trazo discontinuo), mostrando sus diferencias de comportamiento en el núcleo de la estrella, un modo p de grado mayor y un modo g con $n = 9$ y $l = 1$. La zona señalada corresponde a la región donde domina el transporte de energía por convección. Los modos g se propagan principalmente en el núcleo radiativo; portan, por tanto, información sobre el interior profundo de la estrella donde tienen lugar las reacciones termonucleares. Los modos p se propagan a lo largo y ancho de toda la estrella; ahora bien, conforme aumenta l, alcanzan profundidades cada vez menores. Según sea el grado del modo estudiado, éste proporcionará información de capas.

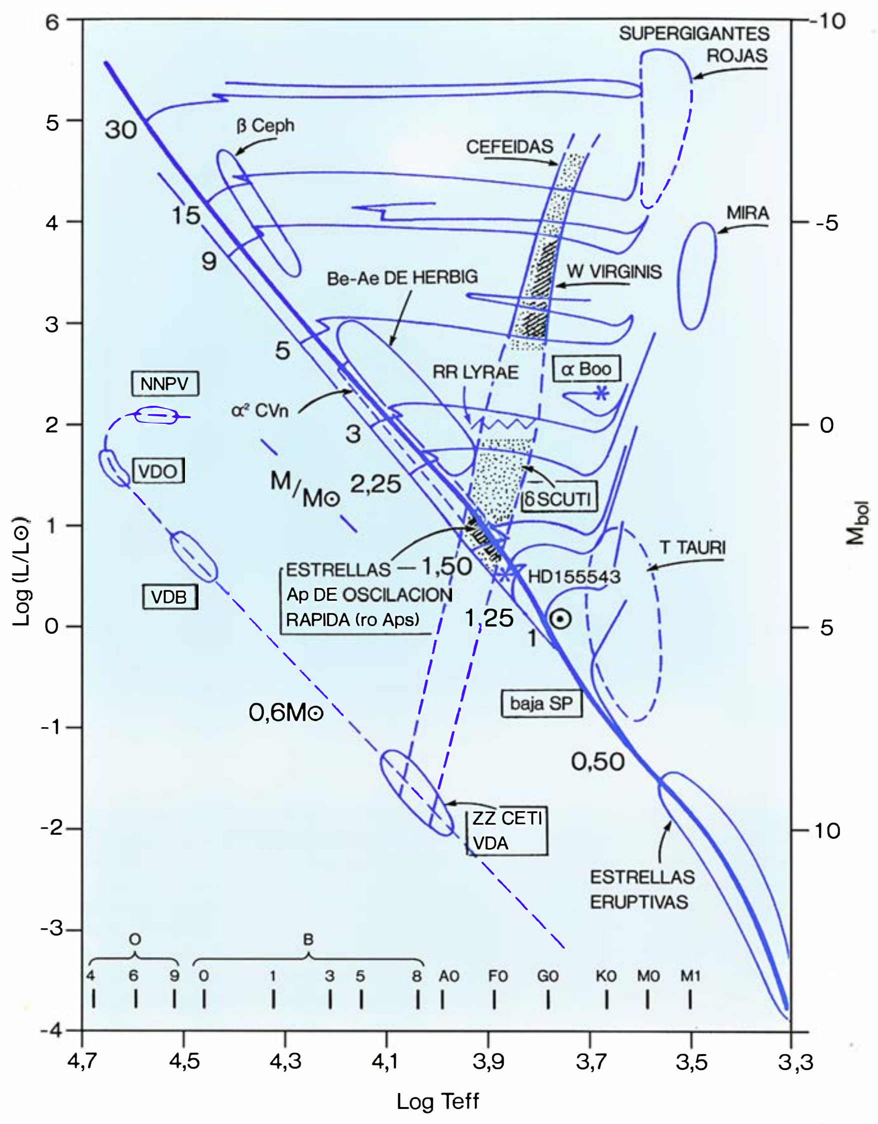
casi horizontalmente, es decir, perpendiculares a la dirección radial, con frecuencias menores que la de empuje, que van disminuyendo conforme *n* aumenta. En las estrellas en equilibrio hidrostático, por ejemplo el Sol, están confinados en el núcleo de las mismas, siendo evanescentes en la zona de convección, lo que complica enormemente su detección, puesto que llegan a la superficie con amplitudes pequeñísimas.

En general, en otras estrellas, dependiendo de su estructura, las oscilaciones se propagan de forma diferenciada: en modos *p* o en modos *g*; por último, algunas estrellas de estructura más complicada, así algunas estrellas δ Scuti, se dan modos de oscilación que se comportan como modos *g* en el interior profundo de la estrella y como modos *p* en la parte más cercana a la superficie.

Una característica básica que identifica el espectro de frecuencias de una estrella, y en la cual pueden apoyarse las observaciones, es el equiespaciamiento en frecuencia entre los distintos modos. En el caso de los modos *p*, las frecuencias de los modos con igual grado *l* y órdenes radiales consecutivos *n* y *n* + 1 se diferencian por una cantidad aproximadamente constante, a la que se denomina $\Delta\nu_0$; relacionada con el tiempo que tarda una perturbación acústica en desplazarse radialmente desde la superficie a su centro, este valor proporciona información sobre la estructura global de la estrella.

Por otra parte, dos modos con *n* consecutivos que difieran en 2 en el valor de *l* (*n*, *l* + 2 y *n* + 1, *l*; siempre para *l* pequeños) poseerán frecuencias muy próximas, comportándose de forma similar desde la superficie hasta casi el punto más interno, donde sufren la reflexión, lugar que depende del grado *l*. Así, la diferencia entre sus frecuencias, muy pequeña aunque medible en algunos casos, nos ofrece información sobre la estructura de la estrella en las capas situadas alrededor de los puntos de reflexión interna; puntos que, para *l* pequeños, se localizan en el núcleo. Por este motivo, el parámetro D_0, que es una medida promedio de esta diferencia de frecuencias, nos da información sobre las condiciones reinantes en el núcleo de la estrella. En lo que a los modos *g* respecta, éstos también están equiespaciados, en período, no en frecuencia; además, la separación media varía según sea el grado del modo considerado.

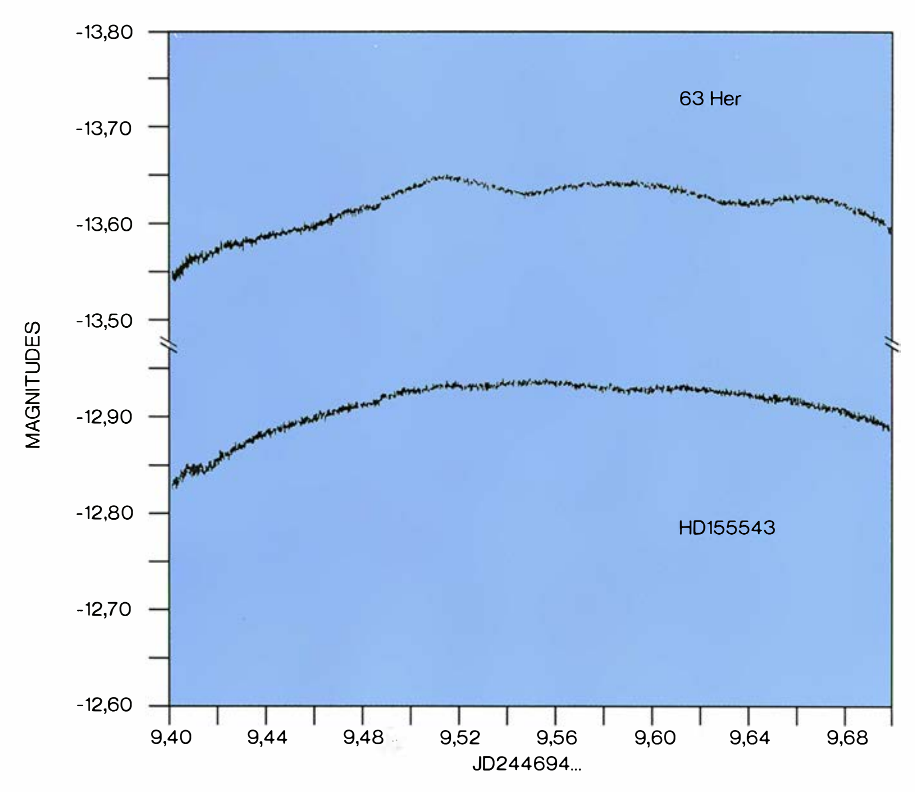
Con lo expuesto hasta ahora, hemos visto cuán útil resulta la detección de oscilaciones propias en una estrella. Pero, ¿podemos observarlas



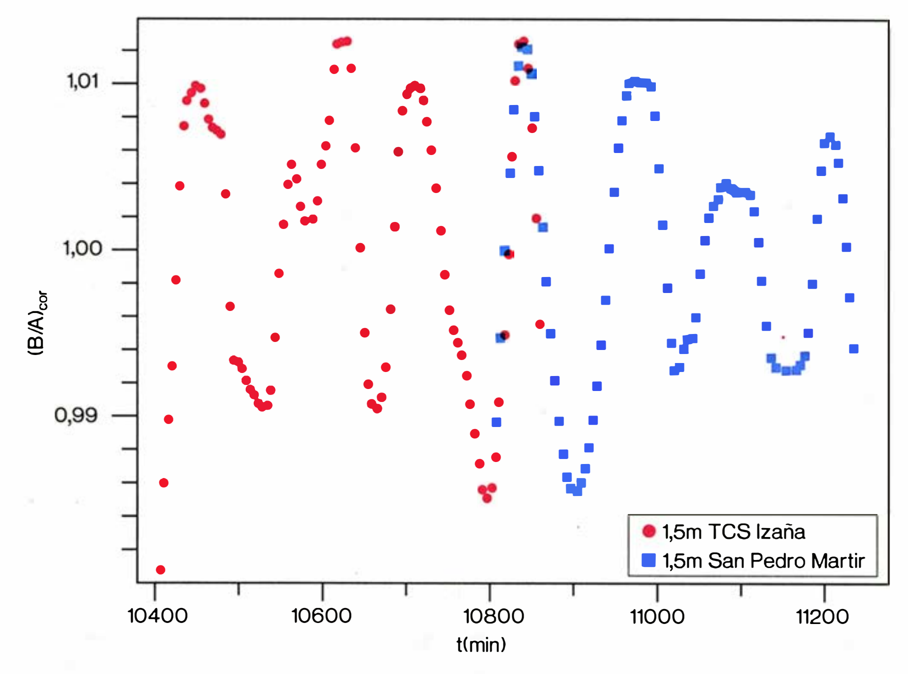
3. DIAGRAMA HERTZSPRUNG-RUSSELL (H-R) para estrellas variables intrínsecas. Se representa el logaritmo de la temperatura efectiva (T_{ef}) y el tipo espectral (de O a M) frente al logaritmo de la luminosidad (L) en unidades solares y la magnitud absoluta (M_{bol}). La secuencia principal media (*línea continua de trazo grueso*) atraviesa el diagrama desde la parte inferior derecha hasta la superior izquierda. Se presentan también diversas trazas evolutivas, predichas por la teoría, para estrellas entre 0,5 y 30 masas solares ($M_\odot$) y la secuencia principal de edad cero correspondiente (*líneas continuas de trazo fino*). La zona comprendida entre las dos líneas discontinuas de trazo grueso es la extensión de la llamada *franja de inestabilidad* de las Cefeidas hacia luminosidades menores, donde se incluyen algunos de los grupos de estrellas estudiadas por la astrosismología: tipo δ Scuti, estrellas A peculiares de oscilación rápida y estrellas ZZ Ceti. La línea discontinua de trazo fino representa la secuencia de enfriamiento de las estrellas enanas blancas; destácanse los cuatro tipos de osciladores compactos conocidos: los núcleos de nebulosas planetarias (NNPV), osciladores de tipo DO más calientes, los de tipo DB con atmósferas ricas en helio y, finalmente, los de tipo DA o estrellas ZZ Ceti con atmósferas ricas en hidrógeno. También se indica la localización del Sol (⊙) y de dos estrellas en las que recientemente se han descubierto oscilaciones (*), la estrella F2 de la secuencia principal HD155543 y la gigante amarilla α Bootis (Arturo).

con las técnicas actuales? Hemos mencionado que hay dos formas principales de medir las oscilaciones; la más común registra las variaciones de brillo en el objeto que deseamos estudiar. Que algunas estrellas sufren variaciones en su luminosidad es un hecho sabido de antiguo. Los árabes conocían la existencia de algunas estrellas variables, a las que dieron nombres acordes con su extraño comportamiento y de las que β Persei, llamada Algol (en árabe, el Diablo), y σ Ceti, llamada Mira (en árabe Maravillosa), son dos ejemplos destacados.

Al poco tiempo de comenzar la astronomía telescópica, por el siglo XVIII, se dio un gran paso adelante cuando, en el año 1789, John Goodricke y Edward Pigott descubrieron, de forma casi simultánea, variaciones periódicas en el brillo de las estrellas δ Cephei y η Aquilae. Estas estrellas serían las primeras en descubrirse de una clase de estrellas va-



4. CURVAS DE EXTINCION de dos estrellas, obtenidas de forma simultánea por medio de fotometría diferencial rápida. Se representa la magnitud instrumental (logaritmo del número de cuentas por segundo) frente a la fecha juliana (tiempo). Las observaciones se realizaron con un fotómetro de tres canales instalado en el telescopio Carlos Sánchez del Observatorio del Teide (Tenerife, España), la noche del 2 al 3 de junio de 1987 bajo condiciones meteorológicas y fotométricas excepcionales. Las dos estrellas medidas son la F2V HD155543, en la que se descubrió la presencia de modos *p*, y la tipo δ Scuti 63 Herculis, en la que se descubrieron un total de seis períodos distintos de pulsación. Se puede apreciar la gran calidad de las medidas en la visión directa del período principal de oscilación de 63Her (2.12 horas) a pesar de su pequeña amplitud (7 milésimas de magnitud).



5. OBSERVACIONES SIMULTANEAS. Se ilustra la curva de luz de la estrella 63Her y se muestra, en función del tiempo, el cociente del brillo de las estrellas 63Her y HD155543 (fotometría diferencial), para las series correlativas de datos obtenidos con idéntica instrumentación en los observatorios del Teide (círculos rojos) situados en Tenerife (España) y de San Pedro Mártir (cuadrados verdes) en Baja California (México), en la noche del 23 al 24 de mayo de 1987. El acuerdo es total, demostrando el origen estelar de la señal, correspondiente a las variaciones multiperiódicas de 63Her.

riables extremadamente importante en la astrofísica actual como medidores de distancia, las Cefeidas.

Las observaciones estaban muy avanzadas cuando S. Shapley postuló, en 1914, la hipótesis según la cual algunos tipos de variabilidad podrían explicarse en términos de contracciones y expansiones cíclicas de la envoltura estelar. A este tipo de variables se las conocería con el nombre de estrellas pulsantes, u oscilantes, en contraposición a otros tipos de variables, como las eclipsantes (Algol, por ejemplo), en las que la variabilidad observada se debe a la binariedad del sistema combinada con efectos geométricos; o como las novas y supernovas, en las que las explosiones repentinas son las causantes de la variabilidad apreciada.

Se han observado unas 25.000 estrellas pulsantes en nuestra galaxia, lo que representa un 2 por millón de la población total, si bien, al menos teóricamente, esta proporción se podría elevar hasta cubrir cerca del 100 por ciento del total. Esas estrellas se agrupan en más de quince tipos diferentes que, en su mayoría, han sido descubiertos mediante observaciones fotométricas, confirmándose posteriormente el carácter oscilatorio de dichas variaciones por medio de medidas espectrométricas de la velocidad radial.

Cada grupo se caracteriza por unos parámetros bien determinados (como la amplitud de la oscilación y su período) y por concentrarse sus miembros en regiones muy específicas del diagrama Hertzsprung-Russell (H-R). En este diagrama, las estrellas se clasifican en función de su temperatura superficial (tipo espectral de más caliente a más frío O, B, A, F, G, K, M) y de su luminosidad. En oposición a lo que podría esperarse de dos magnitudes supuestamente independientes, las estrellas tienden, en general, a agruparse en regiones que definen las distintas *clases de luminosidad*: estrellas enanas (clase de luminosidad VII), subenanas (VI), estrellas de la secuencia principal (V, abreviada en SP) donde se concentra el mayor número de estrellas adultas como nuestro Sol, subgigantes (IV) poco numerosas, gigantes (III) y supergigantes (II y I).

La mayoría de los grupos de variables, llamémoslas clásicas, están formados por estrellas de clases de luminosidad IV a I, abarcando un rango de períodos de oscilación amplísimo, desde una hora hasta varios años.

Cuando se analiza a fondo el diagrama, se destaca inmediatamente la presencia de una gran concentración de variables en una estrecha región,

Clase	nº miembros	TE y CL	Rango de masas	Rango de periodos	Amplitud en: luminosidad (μmag)	velocidad (ms^{-1})	Nº y tipo de modos Obs.	Ejemplo
δ Scuti	≈ 80	A-F IV-V	1,4 a 2	0,5 a 7 h	10^3 a 10^4	≈10^3	≲10 g y p	GX Pegasi
roAps	14	ApSrCrEu	1,4 a 2	4 a 15 min	10 a 10^3	10 a 300	1 a 19 p	HR1217
Tipo solar	(5)	F-K V	0,6 a 1,5	3 a 40min	1 a 10^2	10^{-3} a 10^{-1}	+1000 g y p	Sol
Gigantes	3	G-K III	0,4 a 3	1 h a 10 d	≈10^3	1-100	>3 p	Arturo
EB VDA (ZZ Ceti)	21	DA VII	0,6	1 a 15 min	10^3 a 10^5	-	1 a 25 g	HL Tau-76
EB VDB	7	DB VII	0,6	"	"	-	1 a 10 g	GD358
EB VDO	5	DO VII	≲1	"	"	-	"	PG1707 + 427
NNPV	2	B VI	≲1	"	"	-	≲5 g	K1 - 16

6. ESTRELLAS PULSANTES. Hay básicamente cinco clases de estrellas cuyo estudio ha afrontado la astrosismología. Se caracterizan por sufrir oscilaciones en varios modos, ya sean acústicos (modos *p*) o gravitatorios (modos *g*). Estas son: las estrellas tipo δ Scuti, las estrellas Ap de oscilación rápida (roAps), las de tipo solar o estrellas de la baja secuencia principal, las gigantes amarillas de masa pequeña y, finalmente, los osciladores compactos; se agrupan éstos en cuatro subtipos: las enanas blancas (EB) de tipos DO, DB y DA y los núcleos de nebulosas planetarias (NNPV), respectivamente. La tabla expuesta informa, para cada clase, del número de miembros estudiados hasta la fecha, su tipo espectral y clase de luminosidad, su rango de masas en unidades solares, el rango de períodos con sus amplitudes observables en luminosidad (mediante fotometría) o velocidad (mediante espectrometría), el número y tipo de modos observables y, para terminar, un ejemplo destacado de cada grupo.

situada en su parte central, a la que se conoce con el nombre de *franja de inestabilidad*. Descubierta, inicialmente, para las superluminosas Cefeidas, se ha ido luego extendiendo hacia luminosidades cada vez más bajas merced al descubrimiento de nuevos tipos de variables, como las RR Lyrae o las δ Scuti. En la última década, dicha región se ha extendido aún más, hasta las luminosidades más bajas, con el descubrimiento de oscilaciones en estrellas enanas blancas, las estrellas ZZ Ceti.

La existencia de la franja de inestabilidad parece estar ligada a una característica estructural de las estrellas dotadas de cierta temperatura superficial y luminosidad. Esta característica es la presencia de una capa de ionización, ya sea de helio o de hidrógeno, capaz de dirigir el denominado mecanismo κ (relacionado con la opacidad) que excita resonantemente alguno de los modos de oscilación, aumentando su amplitud y provocando la pulsación. Otro hecho que vale la pena destacar es la total ausencia de estrellas pulsantes observadas en una de las regiones más pobladas del diagrama H-R, ocupada por las estrellas de masa pequeña (menos de tres masas solares) que han evolucionado tras agotar el hidrógeno del núcleo.

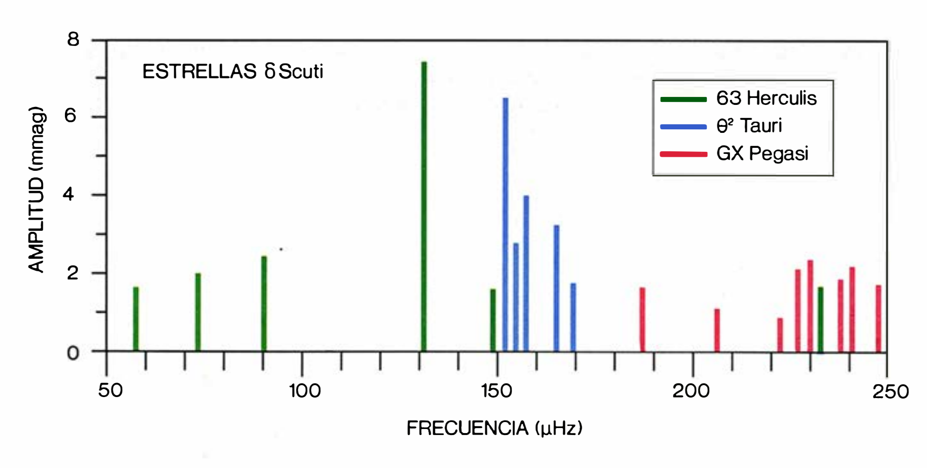
En lo que a la SP se refiere debemos resaltar también la práctica inexistencia de inestabilidad oscilatoria fuera de los lindes de la franja de inestabilidad, si exceptuamos a las estrellas tipo β Cephei y a otro caso particular que describimos a continuación: el Sol. Se trata, no obstante, de un caso que lo único que tiene de especial es su cercanía a nosotros, viniendo a demostrar que la predicción teórica de que todas las estrellas de nuestro universo realizan oscilaciones, si bien con amplitudes a veces pequeñísimas, es cierta.

Desde 1960, año en que R. Leighton y sus colaboradores, de la Universidad de California, lo descubrieran, se sabía que la superficie del Sol mostraba una componente oscilatoria con un período característico de unos cinco minutos; se le suponía un fenómeno aleatorio y asociado a la granulación. Diez años más tarde, Roger Ulrich, también de la Universidad de California, lanzaría la hipótesis según la cual se trataba de ondas acústicas viajando a través de la zona de convección solar, que se convertían en ondas estacionarias atrapadas en el interior, al reflejarse, sucesivamente, en la superficie y en otra capa más interna del Sol.

Si bien existen observaciones del año 1975, realizadas, de forma casi simultánea, por grupos alemanes, británicos y soviéticos, que apuntan la existencia de oscilaciones solares, el verdadero nacimiento de la nueva disciplina, hoy en día universalmente conocida como heliosismología, tendría lugar en el año 1979 con la detección del espectro de modos acústicos propios de oscilación del Sol, centrado en la región de 5 minutos, desde el observatorio del Teide por parte de uno de los autores de este artículo (Roca) junto con miembros de la Universidad de Birmingham, en el Reino Unido. Desde entonces, y debido a la proximidad del Sol que permite resolver espacialmente su disco y, por tanto, observar modos de grados más altos, se han llevado a cabo medidas mucho más detalladas del fenómeno que han traído un conocimiento amplio, aunque todavía incompleto, del espectro global de modos oscilatorios solares. Esto ha permitido el establecimiento experimental de limitaciones muy estrictas a los modelos teóricos solares, que han conllevado una mejora sustancial; en línea con ello se habla ya de un modelo estándar que explique, también, el problema de los neutrinos solares.

La revolución que supuso en física solar la aparición de la heliosismología obligó a plantearse la siguiente cuestión: ¿podrían aplicarse los conocimientos y la experiencia adquiridos en el estudio del Sol a las estrellas de tipo espectral similar y, en general, a cualquier tipo de estrella? La información que se obtendría del espectro de modos propios sería amplia y variada. Las frecuencias de los modos, o en su defecto las separaciones medias entre las frecuencias de los mismos ($\Delta\nu_0$, D_0), nos informan sobre la estructura a escala global de la estrella. Las amplitudes nos señalan los procesos físicos involucrados en la oscilación, especialmente los mecanismos de excitación y amortiguamiento de los modos que, por desgracia y salvo casos muy particulares (mecanismo κ), nos son bastante desconocidos. Finalmente, las fases, o mejor, las diferencias de fase para un mismo modo observado de formas distintas (midiendo simultáneamente sus variaciones en luminosidad y en velocidad, por ejemplo) nos proporcionarán información sobre las propiedades termodinámicas imperantes en la cavidad donde se propaga el modo. Cuanto mayor número de modos consigamos identificar, mayor será la información a extraer.

Así, el término astrosismología designa hoy el estudio del espectro de modos propios de oscilación en todos aquellos grupos de estrellas en los que



7. ESTRELLAS δ SCUTI. La franja de inestabilidad cruza la secuencia principal en una región ocupada por estrellas de tipo espectral F0V a A5V. Se conoce la existencia de inestabilidad pulsacional en esta región desde hace más de 30 años; sin embargo, hasta fechas muy recientes no se había descubierto el carácter multiperiódico y, por tanto, susceptible de estudio por la astrosismología de muchas de estas estrellas. En la figura se presentan los espectros de frecuencias de oscilación de tres estrellas δ Scuti estudiadas recientemente. Cada una de ellas muestra un espectro muy diferente: concentrado para θ^2 Tauri, disperso para 63 Herculis y un término medio de ambos para GX Pegasi. Esta dispersión de resultados según el objeto en cuestión complica la interpretación teórica de las oscilaciones en este tipo de estrellas, aunque supone, a la vez, un aliciente añadido para continuar con el estudio de la estructura de cada una de estas estrellas.

se identifican más de tres modos de oscilación diferentes. Con estas premisas, algunos tipos de pulsantes clásicas, como las Cefeidas, quedan fuera de estos estudios. Sí pueden agrupar tipos clásicos, como por ejemplo las δ Scuti, junto a otros más, descubiertos recientemente, y, por último, el de las estrellas de tipo solar.

En la detección de oscilaciones de tipo solar en otras estrellas nos encontramos con las mayores dificultades, derivadas, sobre todo, de las pequeñísimas amplitudes a medir, que, en el caso solar, son del orden de unos pocos centímetros por segundo en velocidad y del orden de unas pocas partes por millón (3 a 5 millonésimas de magnitud) en luminosidad. Hasta la fecha, dos han sido las formas principales de afrontar el problema. La primera se sirve de técnicas espectrométricas, en su intento de medir las variaciones en la velocidad radial (ΔV) de la estrella, detectables como desplazamientos de la longitud de onda de las líneas espectrales en virtud del efecto Doppler. Para ello se requieren una precisión altísima y una estabilidad temporal increíble; piénsese que, para medir un ΔV menor que 1 m/s, se necesita encontrar $\Delta\lambda/\lambda$ con una precisión mejor que 3×10^{-9}, donde λ designa la longitud de onda. La técnica espectrométrica de *dispersión resonante* se usó en 1979 para descubrir las oscilaciones solares. Técnicas similares, en su mayoría basadas en distintas versiones de los filtros magneto-ópticos, se están aplicando al descubrimiento de oscilaciones en estrellas parecidas al Sol.

La astrosismología por medio de técnicas fotométricas, la segunda vía posible, consiste en medir las fluctuaciones de brillo ($\Delta L/L$) o magnitud (Δm) de una estrella provocadas por cambios en la temperatura de las capas superficiales, en el radio de la estrella o en los dos. Por su sencillez y bajo coste han sido las técnicas más empleadas. Sin embargo, en el caso solar, sólo han logrado proporcionar datos de alta calidad cuando se han utilizado a bordo de ingenios espaciales. ¿Por qué?

La respuesta es simple. La atmósfera terrestre se superpone al flujo estelar observado con dos formidables fuentes de ruido: las fluctuaciones en la transparencia atmosférica o extinción variable (dominante a bajas frecuencias temporales, aunque correlacionada para separaciones angulares sobre la bóveda celeste menores que unos seis minutos de arco) y el centelleo, cuya contribución es más o menos constante para cualquier frecuencia y correlacionado, tan sólo, a separaciones inferiores a pocos segundos de arco.

Para corregir los efectos de la extinción variable, se viene usando la fotometría diferencial estándar. Ahora bien, los cortos períodos asociados a muchas de las estrellas que se desea observar reclaman un seguimiento continuo de la misma que no permite la observación de la estrella de comparación. Este es el motivo por el que se recurre a la fotometría rápida o de alta velocidad; lo ideal, sin embargo, es usar la fotometría diferencial rápida, que mide simultáneamente el flujo luminoso de varias estrellas a la vez con una resolución temporal del orden de pocos segundos. A tenor de ese criterio se ha sugerido el empleo de dispositivos de carga acoplada (DCA) como posibles instrumentos a usar en la detección de oscilaciones estelares, pero aún está por demostrar su estabilidad y rango dinámico. Sin embargo, el uso de DCA posee la enorme ventaja de permitir la observación coetánea de un gran número de estrellas; en caso de pertenecer éstas a un cúmulo abierto, por ejemplo, tendrían todas la misma edad y composición química, lo que facilitaría la interpretación teórica de los resultados.

Sea cual sea la técnica que se use, se ha demostrado el interés astrosismológico de la observación continuada de un mismo objeto, durante tantas noches sucesivas cuantas sea posible. Con dos propósitos básicos: aumentar la resolución en frecuencia e incrementar la relación señal a ruido. Esto puede conseguirse gracias a que la señal estelar es coherente (vida media del orden de decenas de días) y mantiene las mismas frecuencia y fase, dejando de lado cualquier otra contribución a la señal, el centelleo por ejemplo. Al intentar este tipo de observación, se introduce un problema adicional: la aparición de bandas laterales en los espectros de frecuencias (a causa de los huecos diurnos en que no puede observarse la misma estrella), que con su presencia complican la identificación correcta de las frecuencias de oscilación de la estrella estudiada. Este es el motivo por el que se organizan campañas de observación coordinadas desde dos, tres o varios observatorios, adecuadamente separados en longitud geográfica, con el fin de seguir continuamente una estrella sin interrupciones, tapando al máximo la presencia de huecos en las series de datos. Por esta razón, la astrosismología, quizá más que cualquier otra rama de la astrofísica, necesita de la cooperación internacional para avanzar.

Sin embargo, resulta evidente que la inmensa mayoría de los problemas citados se evitarían con observaciones desde el espacio. En este sentido se está trabajando y hay varios proyectos en marcha con idéntico fin. Citaremos: EVRIS, a bordo de una sonda soviética con destino a Marte y el cinturón de asteroides que será lanzada en 1994, y PRISMA, de la Agencia Espacial Europea (ESA), que se encuentra en fase de estudio preliminar por parte de las comisiones competentes.

Hay unos grupos de estrellas en los que la astrosismología está obtenien-

do resultados provechosos. Poseen unas propiedades bien definidas y diferenciadas. En conjunto, sin embargo, todos esos grupos se caracterizan por sufrir pulsaciones en más de tres modos distintos de oscilación. Nos referimos a los siguientes: las estrellas δ Scuti, las estrellas A peculiares de oscilación rápida (roAps), las estrellas de tipo solar o de la baja SP, que tienen por prototipo al Sol, las gigantes de masa pequeña y, finalmente, los osciladores compactos que incluyen, bajo una nueva denominación, a las ya clásicas variables ZZ Ceti. La mayoría de estos objetos son estrellas de masa pequeña (< 2 masas solares) parecidas a nuestro Sol, o provienen de la evolución de las mismas. Por ese motivo, se suele denominar a todo el conjunto estrellas que realizan oscilaciones de tipo solar, aunque en algunos casos (gigantes, enanas blancas) las estrellas concernidas se encuentren en estados evolutivos mucho más avanzados.

El primer grupo a considerar es el integrado por estrellas de tipo espectral entre F0V y A5V, que muestran oscilaciones con amplitudes típicas de unas 10 milésimas de magnitud, con períodos comprendidos entre treinta minutos y varias horas. Forman el grupo de estrellas δ Scuti, cuyos miembros se concentran dentro de la franja de inestabilidad allí donde ésta atraviesa la SP. Aunque el mecanismo de excitación de las oscilaciones (el mecanismo κ) se conoce desde hace años, la posición que ocupan estas estrellas, cerca de la región de la SP donde las estrellas pasan de tener núcleos radiactivos a tener núcleos convectivos, lleva aparejada una enorme complejidad en los espectros de frecuencia observados.

Hasta fechas muy recientes no se habían distinguido ni siquiera 3 modos de oscilación en las estrellas mejor estudiadas; en los últimos años, sin embargo, los resultados obtenidos en varias campañas de observaciones fotométricas diferenciales, desde distintos puntos, simultáneamente, han demostrado que este hecho no era más que un efecto de selección debido a la baja resolución, pobre muestreo o mala calidad de los datos cosechados hasta el momento. De hecho, el análisis de observaciones de la estrella θ^2 Tauri, realizadas en 1987 por Michel Breger, de la Universidad de Viena, en colaboración con astrónomos chinos, italianos, españoles, húngaros y norteamericanos, ha dado como resultado un espectro de amplitudes, concentrado en un estrecho intervalo, de seis frecuencias de oscilación al menos, correspondientes a otros tantos modos propios de oscilación; datos que contrastan con los obtenidos por los autores, en colaboración con el grupo de Françoise Praderie, del Observatorio de París-Meudon, y con Manuel Alvarez, del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México, en las estrellas 63 Herculis y GX Pegasi, donde se muestra un número similar de frecuencias, aunque extendidas a un rango mayor de las mismas. En los últimos cuatro años, se ha dado, pues, un paso importante en el estudio de este tipo de estrellas; esta nueva información proporciona datos observacionales que se están contrastando a la luz de nuevos modelos sobre la estructura de tales estrellas.

Una parte de las conocidas como A peculiares está integrada por estrellas de menor temperatura superficial; se localiza en el interior de la franja de inestabilidad cuando ésta atraviesa la SP. Don Kurtz, de la Universidad de Ciudad del Cabo, descubrió, entre 1979 y 1982, oscilaciones rápidas, de períodos en el rango de minutos con amplitudes típicas de una milésima de magnitud, en varias de estas estrellas. Kurtz definió una nueva clase de variables pulsantes con el nombre de *estrellas Ap de oscilación rápida* (*roAp*).

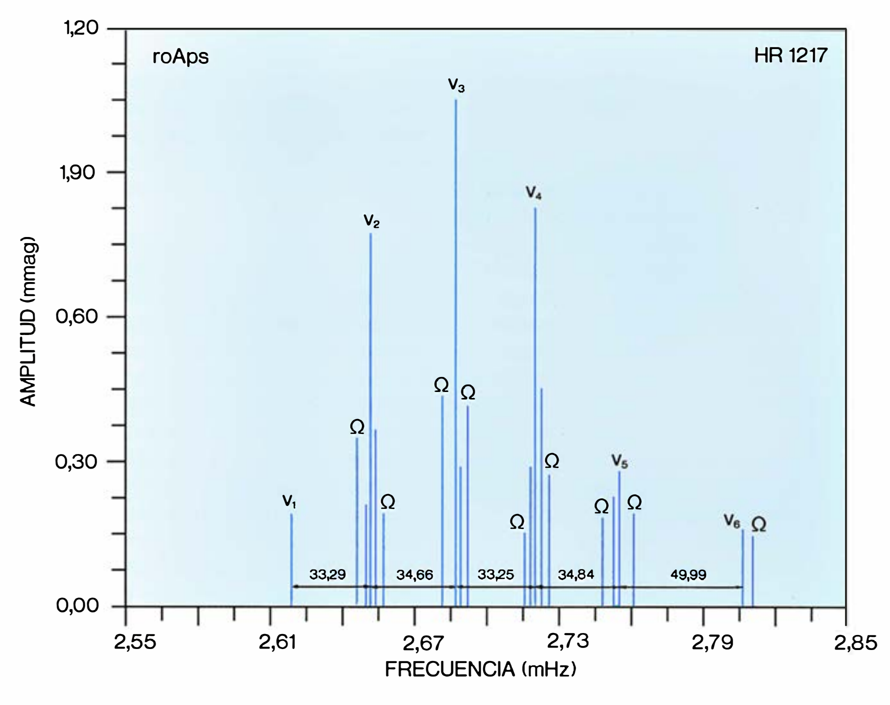
Se conocen ya catorce estrellas de este tipo, que se caracterizan por tener tipo espectral Ap o Fp, con líneas intensas de elementos químicos como estroncio, europio y cromo en sus espectros electromagnéticos.

Además, casi todas poseen índices de color que nos informan de que se trata de estrellas sumamente jóvenes. Otros índices de color, que son indicativos de la temperatura, nos revelan que, a tenor de su tipo espectral, se trata de estrellas más bien frías.

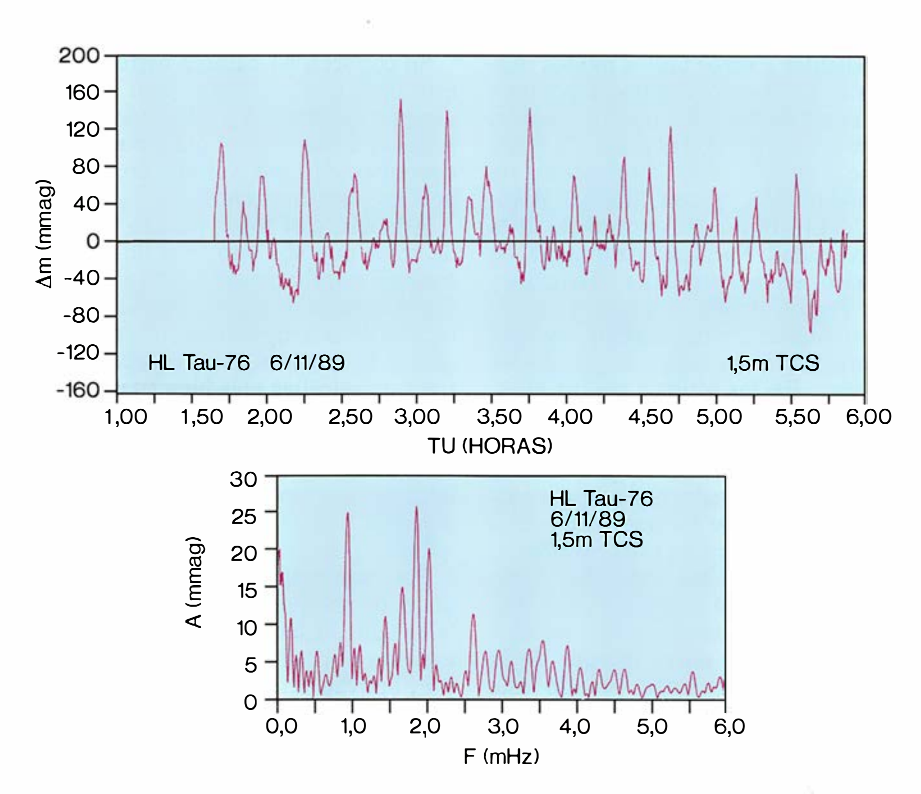
Debido a sus cortos períodos, sus modos de oscilación (se han observado entre 3 y 12 según la estrella) se interpretan como modos acústicos de n grande y grado pequeño ($l < 3$); similares, por tanto, a los solares.

Pero sus amplitudes, unas 500 veces mayores que las observadas en el Sol y unas 50 veces las esperables para estrellas normales de la SP de tipos A y F, apoyan la idea de que el mecanismo de excitación de estos modos difiere del que tiene lugar en el Sol. Hiromoto Shibahashi, de la Universidad de Tokio, ha sugerido que podría hallarse relacionado con el intensísimo campo magnético imperante en todas las estrellas de esta clase.

El interés suscitado por este tipo de estrellas es muy grande: en cuanto osciladores se parecen al Sol y su na-



8. ESTRELLAS Ap DE OSCILACION RAPIDA. Este compacto y poco numeroso (20 se conocen hasta la fecha) grupo de estrellas está integrado por estrellas del tipo espectral A peculiar, más frías y con líneas intensas de Sr, Cr y Eu, que sufren oscilaciones con períodos de pocos minutos y amplitudes del orden de unas pocas milésimas de magnitud. Poseen los espectros de frecuencias para modos acústicos más completos y mejor interpretados que, aparte de nuestro Sol, se conocen hasta la fecha. La ilustración muestra el espectro de amplitudes de la estrella HR1217, obtenido con más de 320 horas de datos de fotometría rápida realizada desde siete observatorios distribuidos por todo el mundo. HR1217 oscila con un total de 6 modos, la mayoría desdoblados por rotación (Ω) y equidistantes entre sí ($\Delta\nu_0 \simeq 60\ \mu$Hz). Los de mayor amplitud se interpretan como modos de grado $l =$ 0 o 2 y $l = 1$, para valores de n elevados (n en torno a 33).



9. OSCILADORES COMPACTOS. En este grupo se integran una serie de estrellas en sus últimas fases evolutivas, caracterizadas por sufrir oscilaciones en el rango de minutos debido a la actuación de varios modos *g*. El grupo conocido por más tiempo y mejor estudiado es el integrado por las enanas blancas de tipo ZZ Ceti, de las que HL-Tau 76 es su prototipo. La curva de luz y el espectro de amplitudes de dicha estrella ilustran la figura. La curva de luz, donde se representa la amplitud en función del tiempo universal (TU), nos enseña el carácter absolutamente errático de este tipo de objetos con máximos pronunciados seguidos, de forma irregular, por mínimos más relajados, que se deben a la actuación síncrona de varios modos de oscilación con períodos cercanos. El espectro de amplitudes muestra la presencia de, al menos, 10 picos bien diferenciados entre 1 y 4 milihertz (períodos de 17 a 4 minutos) causantes de la extraña variabilidad observada.

turaleza encierra todavía múltiples enigmas que la astrosismología ayudará a despejar.

Por otro lado, desde que en 1968 A. Landolt, del observatorio de Kitt Peak en Arizona, descubriese la presencia de variaciones rápidas en el brillo de la enana blanca Hl Tauri-76 de tipo espectral DA, un total de veinte nuevas variables de este tipo han ido engrosando las filas de las llamadas estrellas de tipo ZZ Ceti. Desde el año 1985, se ha incrementado el número de enanas blancas pulsantes de otros tipos espectrales (DO y DB) e incluso se han descubierto oscilaciones en los núcleos calientes de las nebulosas planetarias (NNP).

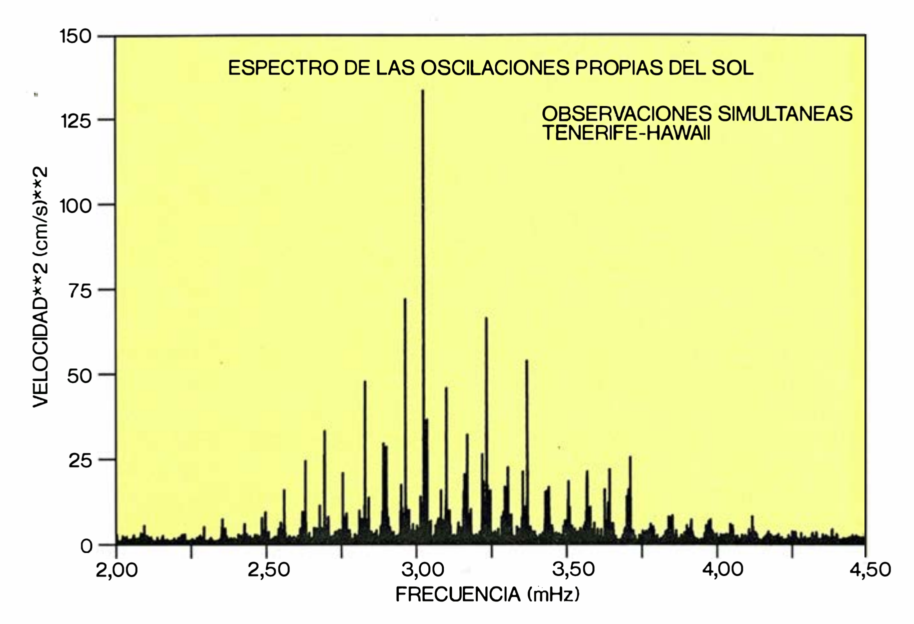
Enanas blancas y NNP se caracterizan por su pequeño tamaño y su enorme densidad. Hoy en día, se agrupa a todas las variables de este tipo con el nombre de osciladores compactos, subdividiéndose en cuatro clases según sea el tipo espectral. La existencia de osciladores de tipo DB fue postulada teóricamente por Don Winget, de la Universidad de Austin, antes de ser descubiertas observacionalmente. Se ha postulado también que las estrellas de neutrones de densidades mucho mayores aún deben, igualmente, realizar oscilaciones en algún momento de su evolución; mas, hasta la fecha, no se ha descubierto ninguna que lo haga.

En conjunto, los osciladores compactos pulsan con períodos comprendidos entre 100 y 1000 segundos con amplitudes menores que 0,1 magnitudes, identificándose entre 4 y 10 frecuencias de oscilación por estrella, aunque, en algunos casos, este número se eleva hasta 30. Se interpretan como modos *g* de *l* pequeño, excitados por el mecanismo κ en las zonas de ionización del helio e hidrógeno de las envolturas de tales estrellas, relacionándolas, por tanto, con otros tipos de pulsantes situadas en el interior de la franja de inestabilidad.

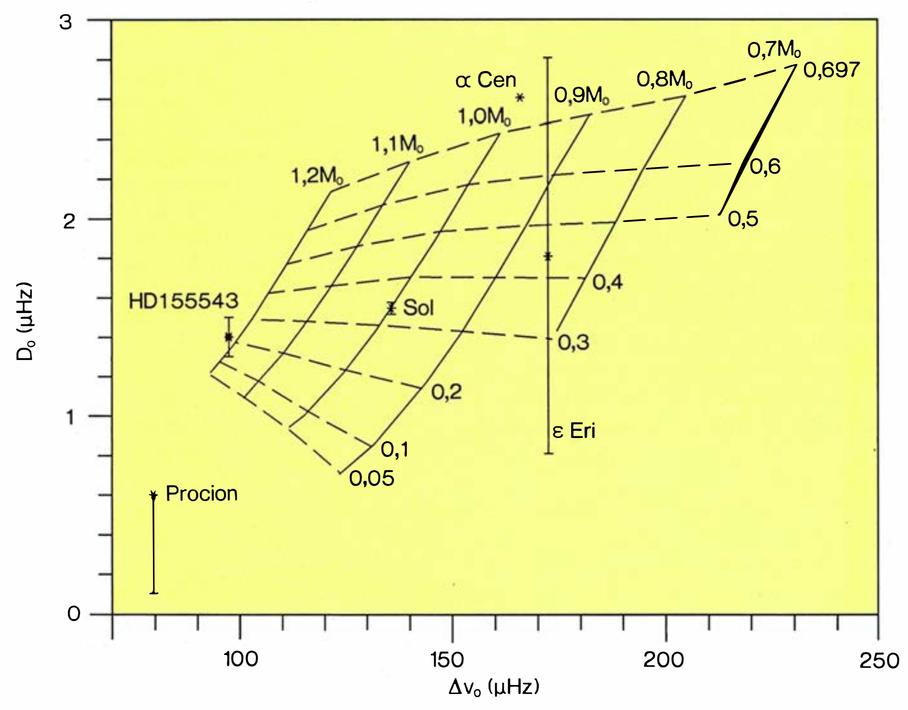
Si ya es interesante el estudio *per se* de sus oscilaciones con el fin de conocer su estructura, reviste la mayor importancia otro tipo de información que se puede extrapolar de la astrosismología de osciladores compactos. En particular, por lo que podemos aprender sobre el comportamiento de la materia bajo condiciones extremas de densidad y temperatura; también, porque determinando las escalas de tiempo evolutivas de estos objetos, a través de la deriva secular de sus períodos ($\dot{P}$), se puede calibrar la secuencia de enfriamiento de las enanas blancas y, en consecuencia, obtener una estimación bastante precisa de la edad del disco galáctico. (Se trata de estrellas muy viejas y constituyen, por tanto, una cota inferior de la edad del universo.) Los tres grupos nombrados hasta ahora, δ Scuti, roAp y osciladores compactos, tienen la ventaja de que sus oscilaciones son relativamente fáciles de detectar con la instrumentación actual. La situación cambia cuando se trata de estudiar las oscilaciones en estrellas normales de la baja SP, mucho más parecidas al Sol. De hecho, desde que en 1979 se descubrió el espectro de las oscilaciones propias del Sol, muchos y variados han sido los intentos de repetir dicho logro en otras estrellas y, aunque se han conseguido algunos resultados preliminares muy interesantes, ninguno ha conducido a resultados concluyentes. Quizá, los más destacados sean los trabajos realizados por Eric Fossat y su grupo de la Universidad de Niza en las estrellas α Centauri, muy parecida a nuestro Sol, y en la subgigante α Canis Minoris, llamada Procyon, a pesar de que algunos de los resultados obtenidos han sido cuestionados.

De acuerdo con la investigación teórica llevada a cabo en 1983 por Joergen Christensen-Dalsgaard y Soeren Frandsen, de la Universidad de Aarhus, habría un aumento de la amplitud de la oscilación conforme aumenta la masa y la edad de una estrella, mientras ésta se encuentre quemando hidrógeno en el núcleo, es decir, en la SP, y exista un dominio del transporte de energía por convección en las capas estelares más externas. El máximo en la amplitud de la oscilación se obtiene para un modelo de estrella de 1,5 masas solares, que se corresponde con una estrella de tipo espectral F0V.

En esa dirección encaminamos algunas de nuestras investigaciones, que dieron un resultado positivo con la detección de oscilaciones, con períodos comprendidos entre 6 y 8 minutos y amplitudes cercanas a 20 millonésimas de magnitud, en la estrella F2 de la SP HD155543. Aunque el ruido provocado por el centelleo atmosférico nos ha impedido determinar las frecuencias y amplitudes de los modos individuales, logramos determinar parámetros tan importantes como sus separaciones en frecuencia citadas anteriormente $\Delta\nu_0$ y D_0, que son útiles para obtener una estima-



10. ESTRELLAS DE TIPO SOLAR. La variante solar de la astrosismología, la heliosismología, ha proporcionado información valiosísima sobre la estructura interna de nuestra estrella y, como es lógico, la extensión de este tipo de estudios a otras estrellas parecidas al Sol (tipo FV a KV) ha cobrado especial interés en los últimos años. Lo que se trata de encontrar es el espectro de frecuencias de una estrella a un nivel de calidad tan excepcional como el que se ilustra. La figura muestra el espectro de potencias (amplitud cuadrada) de los modos *p* solares, conseguido a través de datos espectrométricos de gran calidad obtenidos en dos estaciones localizadas en Tenerife y Hawai. Se aprecian pares alternativos de modos con $l = 0$ y 2 y $l = 1$ y 3, correspondientes a valores de *n* entre 13 y 25. El problema básico son sus amplitudes, que son pequeñísimas (3 a 15 cm/s en velocidad; 1 a 6 millonésimas de magnitud en luminosidad), lo que ha causado que, hasta la fecha, los resultados obtenidos en otras estrellas disten mucho de ser concluyentes.



11. DIAGRAMA $\Delta\nu_0$-D_0 para estrellas de la secuencia principal. Se representan las trazas evolutivas para estrellas de igual masa (líneas continuas), hasta el agotamiento del hidrógeno central, y las isopletas o trazas de igual abundancia de hidrógeno en el núcleo (*líneas discontinuas*), en función de las separaciones en frecuencia D_0 y $\Delta\nu_0$. $\Delta\nu_0$ es la separación media entre modos de igual *l* y *n* sucesivos según la expresión $\nu_{n,l} = \Delta\nu_0(n+l/2+\epsilon)$, con ϵ una constante. Por su parte, D_0 se relaciona con la separación media entre modos de *n* sucesivos que difieren en 2 en el valor de *l* según la expresión $\nu_{n,l+2}-\nu_{n+1,l} = D_0(6+4l)$. La figura demuestra que una vez conocidos, a través de observaciones, los valores de D_0 y $\Delta\nu_0$ para una estrella determinada, automáticamente se pueden conocer su masa y su edad, relacionada esta última con la abundancia central de hidrógeno. Desde la creación del universo, las estrellas de $M \leq 0.8\ M_\odot$ aún no han tenido tiempo de agotar su combustible nuclear por lo que sus trazas evolutivas no están completas. En el diagrama se muestra la localización, con sus barras de error, de aquellas estrellas, incluido el Sol, en las que se han obtenido determinaciones más o menos precisas de $\Delta\nu_0$ y, en algunos casos (Sol, αCen, HD155543), de D_0.

ción precisa de la masa y la edad de la estrella y, en consecuencia, describir, eso sí someramente, la estructura y estado evolutivo de la misma.

Por otra parte, como extensión lógica de la astrosismología de estrellas de tipo solar, en fechas recientes se han puesto en marcha programas para el estudio de las oscilaciones en el siguiente estadio evolutivo, el de gigante, e incluso en los planetas gaseosos exteriores del sistema solar. Los resultados obtenidos por nuestro grupo en la gigante amarilla α Bootis, llamada Arturo, y por F. X. Schmider, de la Universidad de Niza, en el planeta Júpiter han abierto una nueva puerta para este tipo de estudios.

En muy pocos años de intenso trabajo observacional, las viejas técnicas fotométricas y espectrométricas, explotadas al máximo, han alcanzado probablemente el límite de sus posibilidades. Las nuevas progresan a paso firme. El uso de DCA puede deparar sorpresas agradables. Por otra parte, aunque se ha hablado mucho de la posibilidad de usar el *Telescopio Espacial Hubble* con fines astrosismológicos, habrá que esperar algunos años a que se encuentre plenamente operativo y en régimen externo de concesión de tiempos, para que se haga realidad el sueño de muchos astrofísicos: descubrir el espectro completo de modos propios de oscilación de una estrella de tipo solar distinta del Sol, cuya interpretación teórica proporcionaría la herramienta más poderosa para comprobar las teorías de estructura y evolución estelar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OSCILACIONES SOLARES. Teodoro Roca Cortés en *Investigación y Ciencia*, mayo de 1982.

HELIOSISMOLOGÍA. John W. Leibacher, Robert W. Noyes, Yuri Toomre y Roger K. Ulrich en *Investigación y Ciencia*, junio de 1987.

ADVANCES IN HELIO- AND ASTEROSEISMOLOGY. 1988. *Proc. of the IAU Sym.* n.º 123. (Celebrado en Aarhus, Dinamarca, del 7 al 11 de julio de 1986.) Dirigido por J. Christensen-Dalsgaard y S. Frandsen. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.

SEISMOLOGY OF THE SUN AND SUN-LIKE STARS. 1988. *Proc. of the ESA-IAC Sym.* (Celebrado en Puerto de la Cruz, Tenerife, España, del 26 al 30 de septiembre de 1988.) Dirigido por E. J. Rolfe, ESA SP-286. París.

NON-RADIAL OSCILLATIONS OF STARS (2.ª edición). Unno W., Osaki Y., Saio H., Shibahashi H. y Ando H. University of Tokyo Press, 1989, Tokyo.

Juegos matemáticos

Teoría de rigidez, o la prevención de los accidentes improbables

A. K. Dewdney

Conviene ser flexible al pensar en la rigidez. Aprendí esta lección en el verano de 1978, mientras mi padre, mi hijo Jonathan y yo nos esforzábamos en reparar nuestra cabaña en el norte de Canadá. Para remendar la techumbre, que hacía goteras, mi padre había construido un andamio con ramas de abeto recién cortadas. Cuando abuelo y nieto se encaramaron al andamio, aquel rústico armazón comenzó a crujir y bambolearse. Al mencionar yo que el andamio parecía un tanto endeble, mi padre me regañó, diciendo: "Pues mira, puede soportar el peso de diez hombres... y eso que he usado el número absolutamente mínimo de ramas."

¿Quién era yo para discutir con mi padre, leñador experto y matemático aficionado excelente? Volví a mis faenas en el interior de la cabaña. Aún no había pasado un minuto cuando oí un ruido, dos golpes sordos y sendos gritos de sorpresa y dolor. Salí a la carrera y encontré a mi padre y a Jonathan caídos en el suelo. El andamio se había "replegado", por así decirlo. Se levantaron los dos y mi padre sonrió contrito, al tiempo que exclamaba: "¡Qué cosa más condenadamente rara!"

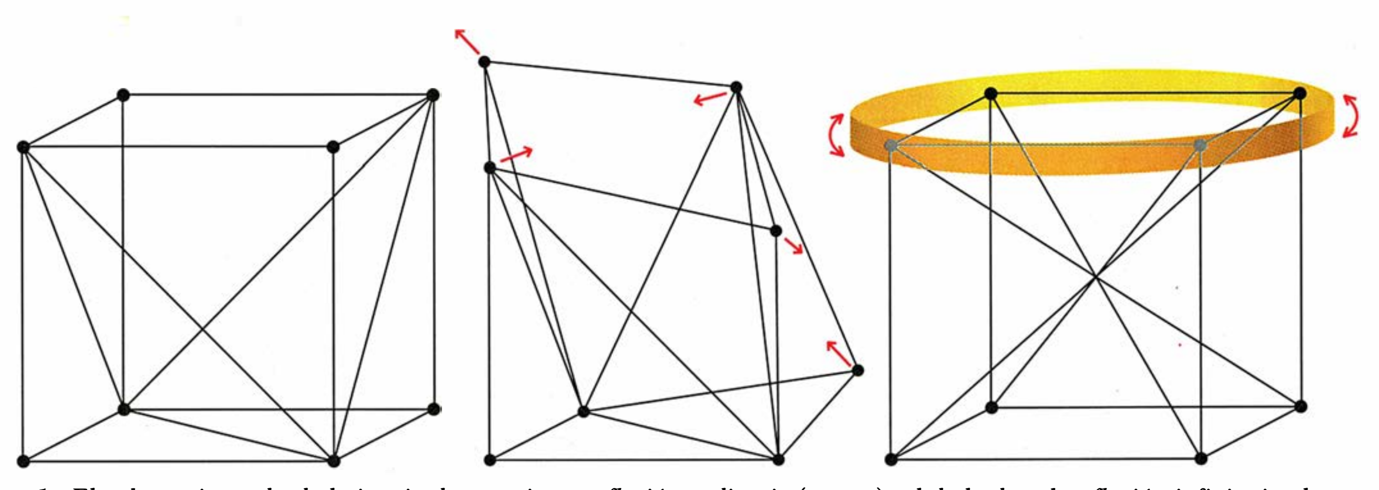
Mal podría culpar a mi padre por haber construido un andamio inestable. Matemáticos e ingenieros se han pasado siglos luchando con la teoría y la práctica de la construcción de estructuras rígidas. Los matemáticos denominan a esta especialidad "teoría de rigidez". He fisgado un poco en el tema, con la esperanza de que unas cuantas ideas claras puedan ahorrar a mis familiares más próximos nuevos accidentes. Mi investigación ha puesto al descubierto una pléyade de amenos rompecabezas con que flexibilizar la mente.

Los especialistas en teoría de rigidez prefieren no construir estructuras con ramas de abeto y unos cuantos clavos. Se valen, en cambio, de una especie de "mecano" mental, compuesto por barras abstractas inextensibles, que no es posible doblar ni pandear, por mucha que sea la fuerza que se les aplique. Tales barras se fabrican en todas las longitudes concebibles; en cuanto se tocan sus extremos, se forma en el acto una junta universal, junta que permite cualquier clase de torsión o giro de las barras en torno a ella, a menos que otras constriñan o impidan el movimiento.

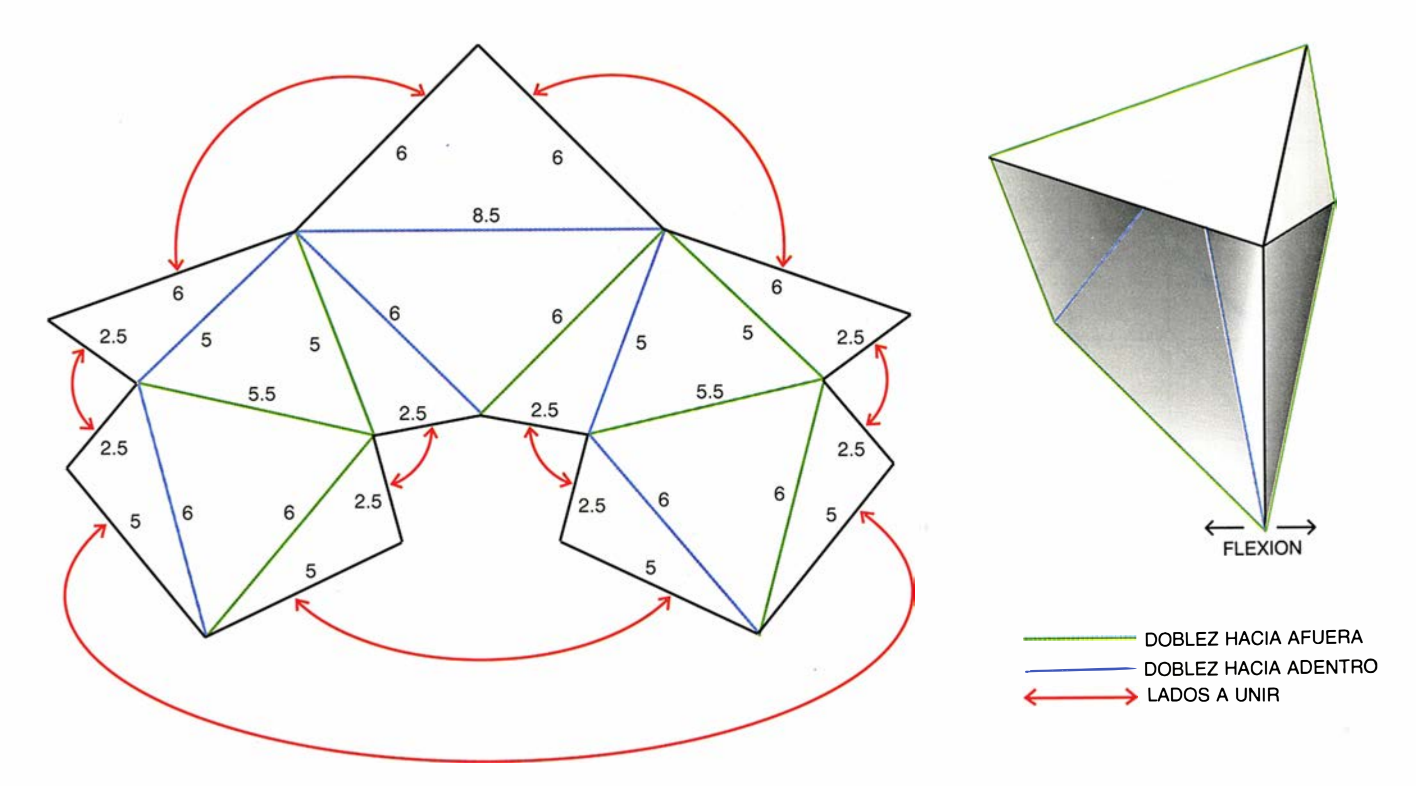
Imaginemos, por ejemplo, un sistema de 12 barras de igual longitud, dispuestas en cubo. Este armazón cúbico no es rígido. Si lo colocásemos sobre una mesa se vendría abajo. De hecho, si tal estructura fuese rígida, los puentes y las torres no necesitarían travesaños diagonales.

Traté hace poco de arriostrar un cubo añadiendo barras diagonales a algunas de sus seis caras cuadradas. ¿Cuántas diagonales son necesarias para tornar rígido al cubo? Me pareció que cuatro deberían ser suficientes, pero acabé encontrando una forma de lograr que el cubo se flexionase. Ni siquiera dotando de barras diagonales a cinco de las seis caras se consigue un cubo rígido. Las cinco barras, juntamente con seis de las ya presentes en el cubo, forman dos tetraedros que hacen bisagra en un larguero común. Al plegar uno contra otro ambos tetraedros, dos de las cuatro juntas que definen el cuadrado no arriostrado se mueven una hacia otra. Las otras dos juntas se mueven hacia afuera. Con indiferencia de la forma en que se añadan a las caras de un cubo cinco barras diagonales, habrá siempre una forma de flexionarlo. Son necesarias seis barras cuando menos.

Si en lugar de arriostrar un cubo por las caras, lo hiciésemos mediante



1. *El cubo arriostrado de la izquierda experimenta flexión ordinaria* (centro); *el de la derecha, flexión infinitesimal.*



2. Construcción de una superficie Connelly-Steffen.

barras diagonales que corren desde una junta a la diametralmente opuesta, pasando por el centro del cubo, ¿qué pasaría? (Los lectores, dejándose llevar del descuidado espíritu de los teóricos, pueden prescindir de las intersecciones de las diagonales.) Un cubo riostrado mediante las cuatro diagonales interiores posee una extraña clase de flexibilidad, que los teóricos denominan "flexión infinitesimal". En cierto sentido, una flexión infinitesimal es un movimiento de una parte de una estructura con respecto a otra. El movimiento, empero, es tan pequeño que ni siquiera existe.

Me explicaré. El cubo provisto de riostras diagonales que vemos en la figura 1 lleva unas flechas que indican una minúscula rotación de la cara superior. Dado que todas las varillas que componen el cubo están hechas de materiales ideales que no tolerarán ni el más mínimo cambio de longitud, la cara superior no puede girarse, ni siquiera en un ángulo diminuto. Sí puede empezar a hacerse girar las caras superior e inferior en direcciones opuestas. Durante este momento infinitesimalmente pequeño, no existe resistencia debida a ninguna otra parte del cubo, porque todas las barras que conectan las caras superior e inferior forman ángulo recto con la dirección de giro.

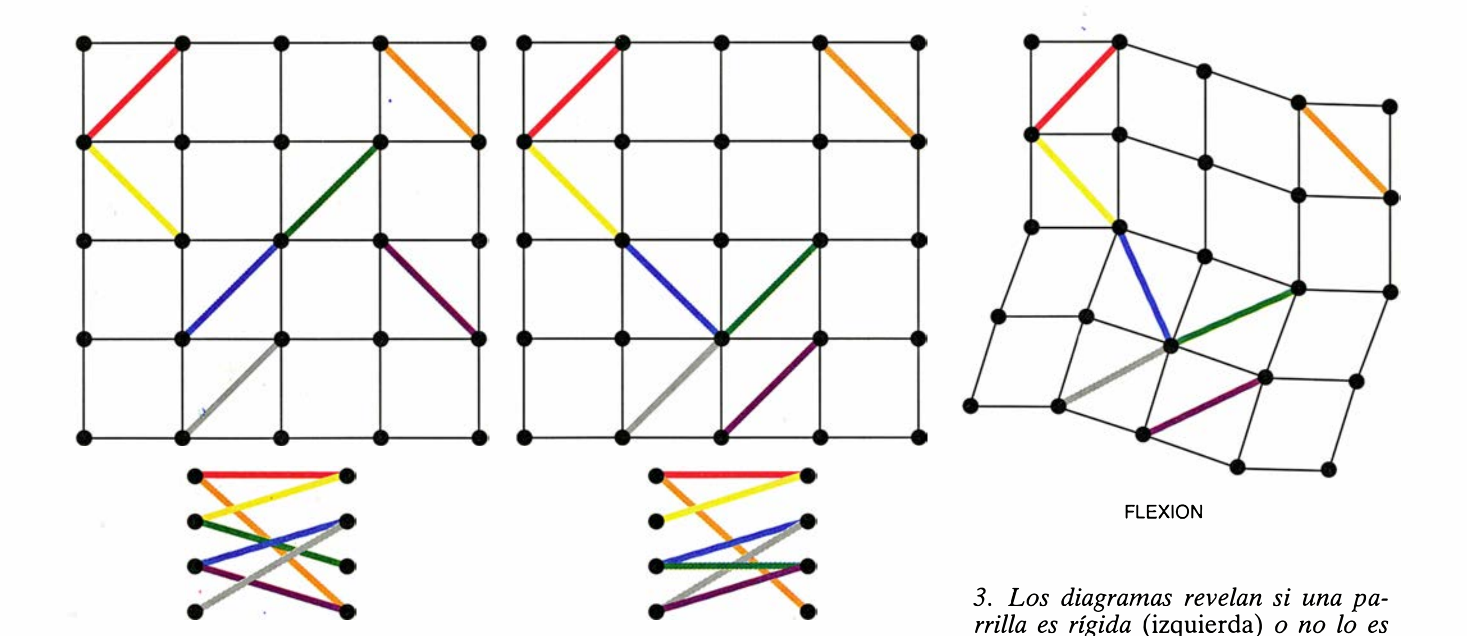
Si construyéramos con materiales reales este cubo diagonalmente arriostrado, resultaría manifiestamente vulnerable a rotaciones, quizás pequeñas, pero medibles. La estructura se bambolearía. Aunque las estructuras que sólo consienten flexiones infinitesimales son catalogadas como rígidas, las que no poseen ninguna flexibilidad en absoluto se denominan infinitesimalmente rígidas.

Los teóricos disponen para sus construcciones no sólo de sus juegos de piezas ideales, sino también de un conjunto de herramientas mentales, compuesto por un gran número de teoremas y técnicas aplicables, entre otras cosas, al arriostrado de un cubo. Una de las herramientas más sencillas y eficaces fue descubierta por los ingenieros del siglo XIX. Un armazón que tenga J juntas ha de tener, cuando menos, $3J - 6$ barras para ser infinitesimalmente rígido. Este teorema es aplicable al cubo. Sus ocho juntas significan que $J = 8$. El número mágico calculado según la fórmula es $(3 \times 8) - 6 = 18$.

Para demostrar que un cubo compuesto por 18 barras (12 aristas más 6 riostras) es infinitesimalmente rígido, podríamos recurrir a un teorema descubierto, en los años cuarenta, por el geómetra ruso A. D. Alexandrov, quien estudió la rigidez de las estructuras basadas en poliedros convexos. Entre tales superficies facetadas se cuentan los cubos, las gemas talladas y los domos geodésicos de R. Buckminster Fuller. Alexandrov demostró que cualquier estructura basada en una de estas configuraciones se torna infinitesimalmente rígida añadiendo a la estructura barras transversales hasta que todas sus caras se compongan de triángulos. Así pues, por lo que al teorema de Alexandrov respecta, un arriostrado triangular de cada cara del cubo (una barra en cada cara) le conferirá rigidez completa.

Los lectores que tengan dificultad en visualizar los arriostrados del cubo cuentan con mi simpatía. Incluso los diagramas de la figura 1 son algo complejos. Tal vez sea llegado el momento de descender desde el lugar de nacimiento de la teoría (el espacio tridimensional) al plano, un espacio bidimensional ocupado por un vasto repertorio de armazones y configuraciones llanas. Aunque los lectores comprenderán fácilmente que, para tornar rígido a un cuadrado, basta un travesaño diagonal, les resultará bastante más difícil determinar qué riostras dan rigidez a un emparrillado formado por cuadrículas. Por ejemplo, ¿cuántas diagonales es preciso añadir para lograr que una parrilla cuadriculada de 4 × 4 se torne indeformable? La figura 3 muestra dos formas de hacer rígida tal parrilla utilizando sólo siete diagonales. Una de esas dos estructuras arriostradas no es rígida; ¿descubrirá el lector cuál?

Podemos deducir la respuesta por el método siguiente. Construyamos un diagrama compuesto por dos con-



3. Los diagramas revelan si una parrilla es rígida (izquierda) *o no lo es* (centro y derecha).

juntos de puntos. El primero representa las cuatro hileras de la parrilla, a razón de un punto por fila horizontal. El segundo conjunto corresponde a las cuatro columnas. Conectemos en el diagrama los puntos apropiados correspondientes a cada una de las siete barras diagonales de la parrilla. Por ejemplo, si hay una barra diagonal en la cuadrícula situada en la tercera fila y la cuarta columna, se traza una línea desde el tercer punto del primer conjunto hasta el cuarto punto del segundo.

La cuestión de si la parrilla es rígida se traduce así en esta otra: ¿es conexo el diagrama de puntos? Dicho de otro modo, ¿existe un recorrido continuo que vaya desde cada uno de los puntos del diagrama hasta cualquier otro? De ser así, y solamente en tal caso, la parrilla es rígida. Este elegante teorema, demostrado por Henry Crapo, del INRIA, en los alrededores de París, y por Ethan D. Bolker, de la Universidad de Massachusetts en Boston, puede ayudar a los lectores a determinar rápidamente si una parrilla se presta a flexión. El diagrama correspondiente a la parrilla de la izquierda es conexo, pero el otro no. Como ejercicio en pensamiento rígido dejaré a los lectores el problema de servirse del teorema Crapo-Bolker para establecer por qué el número mínimo de barras necesarias para reforzar rígidamente la parrilla es 7. Que yo sepa, no existe una teoría homóloga que permita aconsejar a los lectores para arriostrar andamios y otros retículos cúbicos.

En ocasiones, la búsqueda de rigidez puede exigir flexibilidad en sentido literal. No hay mejor ilustración de esta afirmación que la famosa conjetura de la rigidez. En el siglo XVIII, el célebre matemático francés Augustin-Louis Cauchy se preguntaba si todas las superficies poliédricas convexas serían rígidas. Entre tales superficies se cuentan los poliedros triangularizados del teorema de Alexandrov y muchas más. Sus caras o facetas están limitadas por polígonos planos de cualquier número de lados. Por ser convexos, carecen de huecos o muescas de ningún tipo. Cauchy demostró en 1813 que, cuando todas las caras de una superficie poliédrica convexa son triangulares, tal superficie es rígida. El teorema significa que cualquier superficie convexa que se pueda construir mediante triángulos, en la que cada triángulo comparta cada una de sus barras con algún otro triángulo, será rígida.

A pesar de la restricción impuesta por el teorema de Cauchy (a saber, que la superficie sea convexa), los matemáticos empezaron a preguntarse si todas las superficies compuestas por triángulos serían rígidas, aun cuando no fueran convexas. Tales superficies pueden mostrar un aspecto plegado, retorcido o contorsionado en las formas más dispares. La única condición estriba en que sean simples en sentido topológico; esto es, si de pronto su material se tornase de goma y se hinchase, habrían de adoptar forma sensiblemente esférica. Además, la condición de superficie simple exige que ninguna parte de la misma toque a ninguna otra parte de la misma superficie. Los matemáticos conjeturaban que, si una superficie poseía todas estas propiedades, por muy deformada que estuviera, una versión compuesta por triángulos no sería susceptible de flexión.

Durante más de 100 años, nadie supo demostrar esta conjetura, a la que se dio en llamar "conjetura de la rigidez", ni tampoco supo nadie ponerla en entredicho estableciendo una superficie no convexa que estuviera compuesta por triángulos y fuera flexible. Los indicios más sólidos en favor de la conjetura llegaron en 1974, cuando Herman R. Gluck, de la Universidad de Pennsylvania, demostró que la "casi totalidad" de dichas superficies eran rígidas. Con otras palabras, los ejemplos contrarios a la conjetura, de existir, serían verdaderamente raros. Incluso quienes gustan de llevar la contraria habrían de sentirse desanimados ante la fuerza de los indicios a favor.

Pero Robert Connelly, de la Universidad Cornell, estaba convencido en algún rincón de su ser de que la conjetura de la rigidez era falsa. Tras visualizar una tras otra diversas superficies que a primera vista parecían susceptibles de flexión, Connelly se percató un día de que estaba trabajando en contra del teorema de Gluck. Su despacho estaba repleto de modelos enviados por matemáticos aficionados que afirmaban la flexibilidad de los suyos. El teorema de Gluck decía, en efecto: "¡Muy poco probable!" Enfrentado con la misma dificultad, Connelly optó por ponerse a examinar mecanismos, estructuras articuladas capaces de flexión.

Partió de un armazón flexible muy sencillo y aplicó sus conocimientos de

topología, conectando partes de su estructura mediante triángulos simples. Un día sintió que estaba cerca. Ante él se hallaba una superficie no convexa capaz de doblarse. Pero tal superficie no era exactamente lo que en topología se conoce por esfera. En el seno de la superficie, había dos lados en contacto, como al oprimir por lados opuestos un balón de fútbol desinflado. Una situación manifiestamente fastidiosa. ¡Tener la solución tan cerca y tan lejos!

Fue entonces cuando se le ocurrió la idea de un repliegue. Pensó de pronto en introducir una subdivisión de los lados molestos y de los triángulos que los rodeaban, lo que equivalía a formar una doblez... suficiente para evitar el contacto de las dos líneas. ¡El modelo que había construido admitía flexión!

El contraejemplo a la conjetura de rigidez apareció en la literatura especializada en 1978. Al poco, el matemático alemán Klaus Steffen halló una superficie aún más sencilla, también capaz de doblarse, basada en la idea de Connelly. Los lectores que gusten de flexionar su propia versión de la superficie Connelly-Steffen hallarán su desarrollo en la figura 2. Para que resulte de tamaño cómodo de manejar, los lectores deberían interpretar los números de las aristas como longitudes en centímetros. Las flechas que conectan pares de lados indican las uniones que deben efectuarse.

Una vez terminada la superficie Connelly-Steffen, los dos triángulos centrales constituyen un pliegue que permite asir la superficie desde arriba con una mano. Debería entonces poderse alcanzar desde abajo con la otra mano y probar a flexionar el vértice inferior de lado a lado, aunque sólo en pequeña amplitud, unos 10 grados.

Mientras se efectúa esta pequeña flexión, la superficie encierra el mismo volumen. En estos días, Connelly está reflexionando para ver si se verifica la propiedad de volumen constante para todas las superficies flexibles no convexas compuestas por triángulos. Si se decide a conjeturar que sí, más le vale ser flexible. Algún joven aprendiz espabilado puede encontrarle un contraejemplo.

Teniendo yo mismo algo de aprendiz, estuve creándole a mi padre algunas molestias tras el desplome del andamio. Mas a las pocas horas del accidente, el andamio volvía a estar en pie. Su estructura era idéntica a la anterior, salvo por una rama de abeto adicional. Estoy seguro de que los minúsculos bamboleos que yo detecté eran meras flexiones infinitesimales.

Libros

Einstein, moluscos del plancton, tendencias en historia de la ciencia y saber de los árabes

Luis Navarro, Joandomènec Ros y Luis Alonso

THE COLLECTED PAPERS OF ALBERT EINSTEIN. Edición dirigida por John Stachel. Princeton University Press; Princeton, 1987... "EL SEÑOR ES SUTIL..." LA CIENCIA Y LA VIDA DE ALBERT EINSTEIN, por Abraham Pais. Ariel; Barcelona, 1984. ALBERT EINSTEIN: PHILOSOPHER-SCIENTIST. Edición de Paul A. Schilpp. The Open Court; La Salle, 1970. NOTAS AUTOBIOGRÁFICAS. Alianza; Madrid, 1979. EINSTEIN AS MYTH AND MUSE, por Alan J. Friedman y Carol C. Donley. Cambridge University Press; 1985. ALBERT EINSTEIN. CARTAS A MILEVA. Introducción de José Manuel Sánchez Ron. Mondadori; Madrid, 1990.

Einstein se mantiene como un mito que, a no dudarlo, permanecerá indefectiblemente asociado a los principales desarrollos de la física de nuestro siglo. Pero se trata de un mito que se resiste a ser enmarcado en el ámbito de lo estrictamente científico. Se podrá cuestionar el interés de su pensamiento filosófico (él mismo no se consideraba un filósofo, a pesar de su inusual interés por la filosofía), pero difícilmente podrá negarse su influencia en la filosofía de la época. Se ha convertido, además, en un símbolo a la hora de analizar las relaciones ciencia-sociedad.

Todo lo anterior ayuda a comprender la continua e innumerable cantidad de publicaciones que durante más de medio siglo vienen ocupándose de los diferentes aspectos de su vida y de su obra, así como de su pensamiento y de las múltiples repercusiones sociales de su figura. Tan monumental bibliografía sobre nuestro personaje podría llevar a una desorientación por parte del estudiante y del aficionado a la hora de seleccionar (por ejemplo, mediante una media docena de libros) lo más representativo entre los trabajos de calidad que hoy existen sobre el tema.

Puede resultar dudoso para algunos que sigan apareciendo publicaciones con auténticas novedades sobre Einstein. Quien así piense cambiará de opinión sin más que echar un vistazo a los dos volúmenes hasta ahora publicados de *The Collected Papers*. Son los primeros de una colección de unos treinta tomos que, a través de la publicación de más de 14.000 documentos, muchos de ellos inéditos, afectará sustancialmente a la imagen que hoy tenemos del mito. Por sus objetivos, duración y envergadura se trata de una obra de biblioteca institucional, no personal.

Para mi gusto, "*El Señor es sutil...*" es referencia básica para aproximarse a la vida y la obra de Einstein, especialmente para aquellos que poseen una base científica. El objetivo de la obra es ofrecer una panorámica de "los conceptos del mundo de la física tales como eran cuando Einstein se hizo físico; cómo los cambió, y qué herencia científica ha dejado". A favor del autor juega, pienso yo, el tratarse de un historiador que proviene del campo de la investigación en física teórica y que, además, fue colaborador de Einstein durante los últimos años de la vida de éste. Las teorías que han hecho universalmente famoso al creador de la relatividad no se pueden analizar con propiedad sin recurrir a los formalismos matemáticos, pero Pais ha hecho un loable esfuerzo por mantenerse dentro de unos límites que permiten una lectura ágil al iniciado, remitiéndole a textos más especializados cuando la complejidad del tema lo requiere. El seguimiento que en este libro se hace de la vida y la obra de Einstein incluye aspectos filosóficos, políticos y artísticos de su personalidad.

Con el transcurso del tiempo nuestro personaje sobrepasó la frontera del ámbito científico ordinario, dirigiendo cada vez con más intensidad su atención hacia el objetivo, el método y los límites de la ciencia. No obstante, como afirmó Born en cierta ocasión, "la filosofía de Einstein no es un sistema que se pueda leer en un libro; hay que tomarse la molestia de abstraerla de sus trabajos de física y de otros escritos más generales y folletos". *Philosopher-Scientist* es una magnífica ayuda para poder profundizar en el pensamiento einsteiniano, que es analizado desde diferentes ópticas a través de veinticinco ensayos, algunos de los cuales se deben a personalidades de la talla de Sommerfeld, De Broglie, Pauli, Born, Reichenbach, Bridgman y Gödel.

Las *Notas Autobiográficas* resultan de un inestimable valor por su carácter testimonial; escritas personalmente cinco años antes de su muerte, representan, tal vez, lo único que pueda catalogarse como una autobiografía científica del mito. No menos interesante resulta "Reply to Criticism", también en *Philosopher-Scientist*, donde Einstein contesta a las críticas que, entre las que figuran a lo largo de las más de seiscientas páginas de la obra, él consideró más significativas.

En *Einstein as Myth and Muse*, un científico (A.J.F.) y un crítico literario (C.C.D.) aúnan sus esfuerzos, con éxito, para presentar una visión seria y documentada del impacto causado por la obra de Einstein en el ámbito social, especialmente en el de la creación artística y, dentro de éste, en el campo de la literatura. Es una muestra contundente de la influencia que la ciencia moderna ejerce sobre nuestra cultura. Los autores se esfuerzan en poner de manifiesto, por ejemplo, que el cubismo de Picasso, la relatividad de Einstein y el *Ulysses* de Joyce son manifestaciones culturales cuya coincidencia en el tiempo no cabe achacar a la mera casualidad. Se trata, en fin, de un libro original y riguroso, cuya lectura resulta amena y gratificante, en especial para los que creemos que la separación tradicional entre ciencia y humanidades es un convencionalismo que ni siquiera se ajusta al desarrollo de la historia de la cultura.

He anticipado que *The Collected Papers* es fuente de diversas revelaciones acerca de la figura de Albert Einstein. Concretamente en el primer volumen se incluyen cincuenta y una cartas cruzadas entre él y Mileva Maric, la que sería después su primera esposa; cubren un período de amistad y noviazgo entre 1897 y 1902. La publicación de esta correspondencia ha contribuido a levantar una cierta polémica en torno al papel que pudo desempeñar Maric en la creación y el desarrollo de las teorías de su marido. Toda esta correspondencia ha sido recogida en *Cartas a Mileva*. J. M. Sánchez Ron la ha puesto al alcance de un amplio espectro de público, gracias a la imprescindible situación de los personajes en el correspondiente escenario social. La abundancia de notas aclaratorias con que se comple-

ta esta presentación hace que la lectura resulte apasionante para el aficionado, a la vez que la convierte en material histórico adecuado para los que persigan unos objetivos más profesionales.

Además de colaborar a la fiel reconstrucción de la persona del joven Einstein, presumiblemente muy distinta de la que por retroproyección de su imagen posterior de hombre sabio se ha venido asumiendo, las cartas crean en el lector una sensación de intriga por conocer los detalles del verdadero papel desempeñado por Maric en el desarrollo del pensamiento científico de Einstein. Desgraciadamente la documentación hasta hoy publicada no permite avanzar en la solución de este enigma. En cualquier caso, *Cartas a Mileva* es un ejemplo de trabajo al que nos encontramos poco habituados, pues en él se pueden encontrar algunas relaciones entre la trayectoria académica y científica del joven Einstein, y el contexto social en que se enmarcó su existencia; un tipo de conexiones que están ciertamente de actualidad dentro de los estudios modernos en historia de la ciencia.

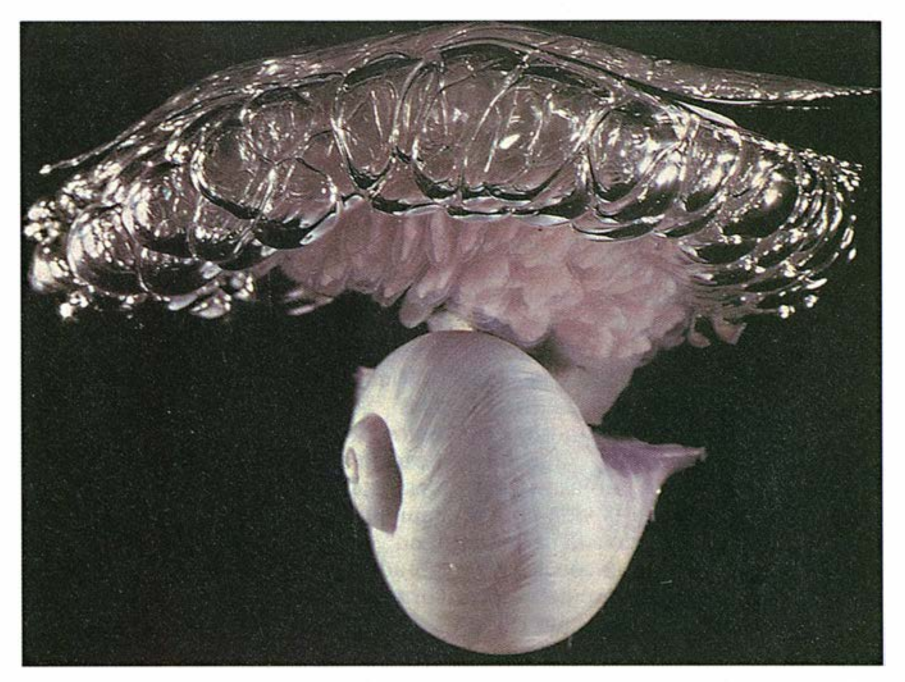
Quizá la consulta de los libros aquí citados contribuya a liberar a la figura de Albert Einstein de una buena cantidad de la sarta de imprecisiones, malentendidos y deformaciones con las que suele asociarse la imagen de nuestro protagonista. El desarrollo actual de la historia de la ciencia hace posible que el mito Einstein comience verdaderamente a asentarse sobre las auténticas bases que justifican su grandeza. (L.N.)

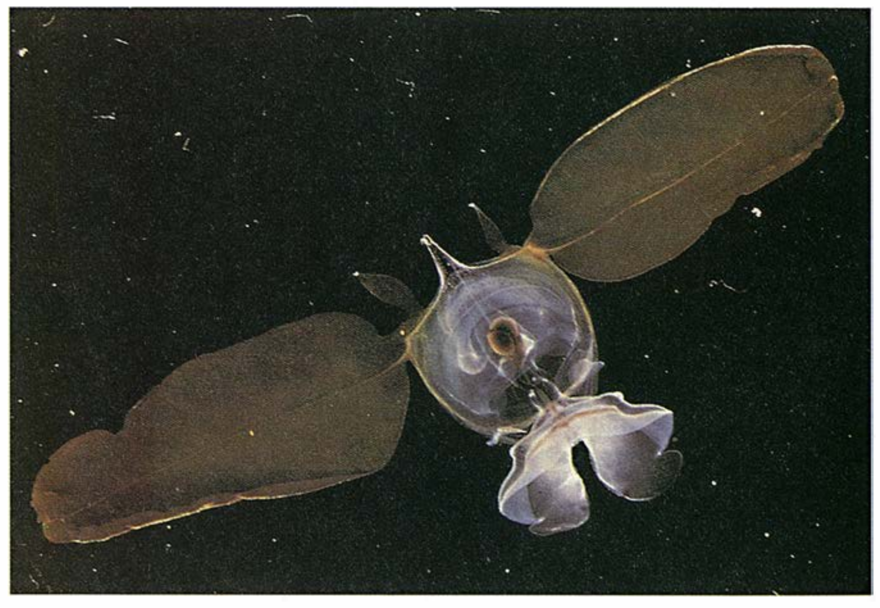
(*Addenda.* A la exposición anterior hay que añadir el libro del profesor Navarro *Einstein, profeta y hereje*, publicado por la barcelonesa editorial Tusquets en 1990. No es absolutamente necesario tener que recurrir a recientes descubrimientos de material histórico inédito para poder presentar alguna aportación a la fiel reconstrucción del pensamiento científico. A veces basta con analizar críticamente el material existente. Es el caso del libro de Navarro, donde se dan argumentos suficientes para justificar que la relación entre física estadística y física cuántica fue mucho más profunda de lo que la imagen usual suele presentarnos a través de los textos tradicionales. Y ello no es irrelevante, sino que tiene implicaciones de cierta trascendencia. Por ejemplo, la aproximación, participación y alejamiento respecto de la física cuántica que Einstein protagonizó a lo largo de su vida, pueden entenderse de forma natural como un proceso continuo regido por condicionamientos que en el libro quedan suficientemente aclarados. Pero, además, en el mismo libro se rellena una importante laguna al exponer de forma correlacionada las cruciales aportaciones que Einstein realizó a la física del siglo veinte, dejando aparte sus divulgadísimas teorías relativistas. N. de la R.)

PELAGIC SNAILS. THE BIOLOGY OF HOLOPLANKTONIC GASTROPOD MOLLUSKS, por Carol M. Lalli y Ronald W. Gilmer. Stanford University Press; Stanford, 1989.

Algunos *phyla* de organismos son tan vastos que difícilmente es posible llegar, dentro de la extensión normal de un libro, a describir adecuadamente su diversidad y biología. Tal es el caso de los moluscos, por no hablar de los insectos o de las fanerógamas. Siempre existe el recurso de dividir el grupo en cuestión en subgrupos más o menos naturales, casi siempre taxonómicos, y tratarlos con algo más de detalle (en uno de los ejemplos citados, mariposas, escarabajos, moscas, etc.).

Es más raro que las monografías traten de grupos en función de sus hábitos o hábitats: escarabajos acuáticos, plantas carnívoras, aves marinas, etcétera. Y, sin embargo, la riquísima variedad de formas, comportamientos y adaptaciones de los organismos es menos difícil (que no más fácil) de entender cuando los requerimientos o las restricciones ambientales son se-





Janthina prolongata *(arriba) y* Cavolina tridentata *(abajo).*

mejantes, con lo que pueden haber generado adaptaciones evolutivas análogas y, por ello, más fácilmente interpretables.

El libro de Lalli y Gilmer se ocupa de un grupo poco conocido de moluscos gasterópodos: los que pasan toda su vida en la superficie del océano o cerca de la misma, que es algo que la mayoría de gasterópodos marinos no hacen nunca (porque viven asociados al fondo, es decir, son bentónicos) o sólo temporalmente (si tienen una fase larvaria planctónica). Los autores, especialistas en gasterópodos pelágicos (propios de las aguas libres), han sabido trasladar al libro esta visión de conjunto que sólo los expertos son capaces de proporcionar.

Tres de los cinco grupos que el libro trata son, en realidad, garbanzos negros pelágicos pertenecientes a grupos netamente bentónicos (tal es el caso de los iantínidos y los heterópodos, prosobranquios, y de los nudibranquios pelágicos). Pero los otros constituyen dos órdenes, los tecosomas y los gimnosomas (llamados colectivamente pterópodos), de opistobranquios completamente pelágicos. Para el lector entendido no será necesario describir las características de los grupos; el lector no experto pero familiarizado con la terminología científica sabrá deducir de los nombres ya clásicos de éstos (heterópodos, pterópodos, gimnosomas, tecosomas) los principales caracteres diferenciales de estos moluscos, en los que la adaptación a la vida en las aguas libres ha conducido a la pérdida o reducción notable de la concha y a la modificación del pie musculoso que ya no se usa para reptar, sino para nadar.

Los gasterópodos pelágicos comprenden unas 140 especies (frente a las aproximadamente 40.000 de gasterópodos bentónicos, dulceacuícolas o terrestres), pero su diversidad de adaptaciones al medio las hace tan interesantes como lo puedan ser los cefalópodos, el otro único grupo de moluscos con representantes pelágicos. Los autores pasan exhaustiva revista a los gasterópodos pelágicos, en especial a los aspectos biológicos y ecológicos, mientras prestan una menor atención a los taxonómicos y de distribución, y los anatómicos son tratados sólo en la medida en que su conocimiento es necesario para comprender aspectos funcionales.

Los animales que nos ocupan son pequeños y ninguno de ellos es adscribible al necton (organismos capaces de desplazarse nadando); pasan toda su vida en el plancton (holoplancton) o bien viven adheridos a la película superficial del agua, colgando de ella (neuston). Han llegado a ser lo que son a través de adaptaciones más o menos convergentes al medio de las aguas libres, y de ahí que su diversidad estructural, a pesar del reducido número de especies, sea mayor que la de los gasterópodos bentónicos típicos.

En el capítulo dedicado a los *Constructores de almadías* se nos presentan los Iantínidos, que construyen balsas de burbujas a partir de las secreciones mucosas del pie; de ellas cuelgan de la superficie del mar y a ellas fijan las puestas. El color de concha y cuerpo es violáceo, como el de otros gasterópodos neustónicos (los gláucidos) y el de los sifonóforos flotantes de que se alimentan.

Depredadores visuales es el subtítulo del capítulo que versa sobre los heterópodos, que cuentan entre los animales más bellos e interesantes del zooplancton; el calificativo destaca la posesión de órganos de la visión muy complejos, relacionados con la alimentación carnívora y especializada del grupo. El cuerpo y la concha transparentes de estos caracoles muy modificados han despertado siempre el interés de los morfólogos, que no precisan disecarlos para reseguir las complejidades de la anatomía.

Vienen a continuación los Tecosomas. Son los primeros opistobranquios pelágicos, en los que la modificación a partir de un antepasado generalizado ha conservado la concha (aunque reducida: eutecosomas, o bien gelatinosa, de neoformación: pseudotecosomas); el pie está transformado en aletas batientes, son filtradores, realizan migraciones verticales y constituyen un alimento básico para peces, aves marinas y cetáceos. Son abundantísimos en todos los océanos, y sus conchas se acumulan en el fondo, formando sedimentos (barro de pterópodos). Otra de sus características es de actualidad: su concha de carbonato cálcico es de aragonito, que se disuelve más fácilmente que las de calcita de foraminíferos y cocolitoforales, y con ello puede tener mayor importancia en el tamponamiento del exceso de CO_2 de origen antropogénico que entra en el océano.

Lo que de conservadores puedan tener los pterópodos con concha lo han perdido los Gimnosomas. Su aspecto recuerda el de muchos de los monstruos a que nos tiene acostumbrados la ciencia-ficción cinematográfica, pues son depredadores muy especializados a los que la pérdida de la concha les ha permitido desarrollar trompas, ventosas, ganchos, estructuras semejantes a sacacorchos que complementan la típica rádula y con las que capturan eficazmente, extraen de la concha y se comen a sus parientes tecosomas.

El último capítulo agrupa a los nudibranquios pelágicos, de los que quizá los más curiosos sean los gláucidos, babosas bellísimas pero temibles porque utilizan como arma ofensiva-defensiva los cnidocistos de la carabela portuguesa y otros sifonóforos urticantes, con los que pueden incluso matar a un hombre adulto.

El libro se completa con un útil glosario y un índice analítico. La ilustración es magnífica; a los dibujos detalladísimos de Lalli se unen muchas fotografías, tanto en blanco y negro como en color, obtenidas no como suele ser el caso, a partir de ejemplares conservados y contraídos, sino de individuos vivos, generalmente fotografiados por escafandristas en su ambiente natural de las aguas libres. La fotografía de *Cavolinia tridentata*, con los apéndices del manto extendidos, justifica plenamente el apelativo de "mariposas del mar" que han recibido los pterópodos.

En definitiva, un libro útil y magnífico que saca de la oscuridad a unos animales planctónicos mal conocidos hasta hoy, a pesar de su importancia trófica o de los logros evolutivos que representan. Lalli y Gilmer han sabido presentar como se merecían a estos animales bellísimos, y utilizan para ello un estilo conciso, una presentación sintética pero rica en matices, e incluso nos deleitan con algunos apuntes de historia de la zoología y de la biología marina, aspectos que echamos en falta en muchos de los textos actuales. Su lectura es apasionante. (J-D. R.)

NEW TRENDS IN THE HISTORY OF SCIENCE. Dirigido por R. P. W. Visser, H. J. M. Bos, L. C. Palm y H. A. M. Snelders. Rodopi; Amsterdam, 1989. **CRITICAL TRADITIONS IN CONTEMPORARY ARCHAEOLOGY**. Dirigido por Valerie Pinsky y Alison Wylie; Cambridge University Press; Cambridge, 1989. **PHYTOARCHAEOLOGY**, por Robert R. Brooks y Dieter Johannes. Dioscorides Press; Portland, 1990

Demos de entrada la razón de abordar tres obras de, al parecer, dispar contenido. Se trata de pergeñar la situación actual de la historia de la ciencia; para ello, hemos seleccionado un libro misceláneo y dos ceñidos a una sola disciplina, que se saliera de la consideración habitual (física, biología, geología, química o matemática) y fuera, además, de naturaleza histórica; ésta, la arqueología, puede

estudiarse en su vertiente teórica, los principios en que se apoya y por los que debe regirse, y en su vertiente práctica, o cómo acometer el ejercicio de la misma de la manera más eficaz.

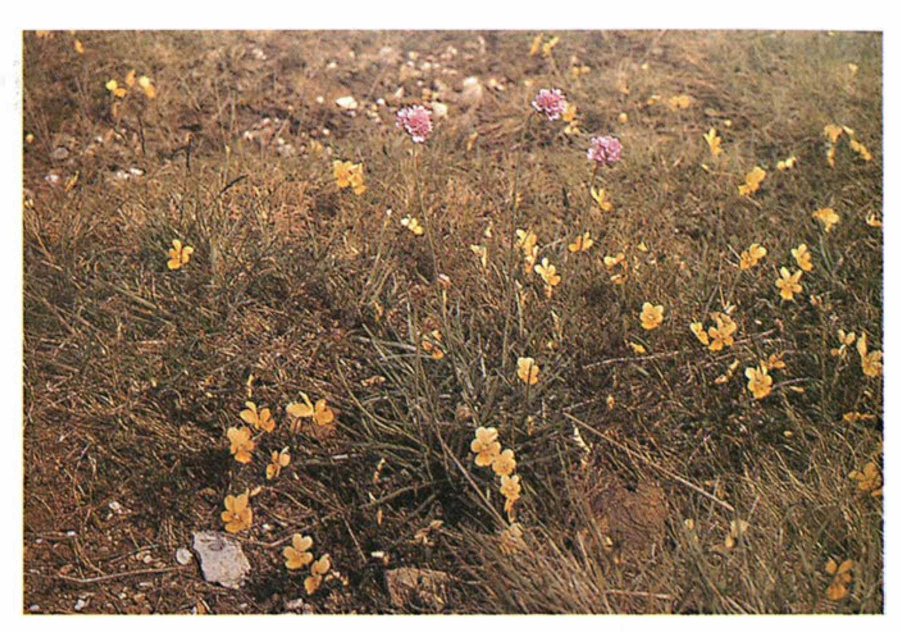
Era frecuente que, en las memorias de oposiciones a las cátedras de historia de la filosofía, el candidato disertara sobre la necesidad de un nuevo enfoque de la disciplina: nuevas periodizaciones, recambios en la galería de retratos, replanteamiento de los métodos heurísticos, etcétera. La historia de la filosofía venía a ser la lucha de Sísifo contra el destino.

Podría pensarse que la historia de la ciencia corre ese mismo riesgo. No hay tal. Por mucha carga ideológica que se ponga en determinadas visiones, la luz acaba haciéndose para todos. Las polémicas sobre la ciencia española terminan diluyéndose cuando se abandonan las obsesiones y comienzan a manejarse los datos. A diferencia de la historia de la filosofía, que se presta a la dormición metafísica, por recordar una expresión gráfica de Kant, la ciencia debe apelar a la claridad de la observación o a la contundencia del ensayo.

Las nuevas tendencias a las que aludimos son temas viejos y recurrentes en el quehacer historiográfico: insistencia en las teorías e hipótesis o prevalencia de los condicionamientos sociales; quedarse en la visión elitista de grandes figuras y profundos paradigmas o extender el campo a los equipos, la masa crítica o los gigantes sobre cuyos hombros vieron más lejos aquéllas; abrir nuevas brechas de investigación o replantearse las interpretaciones recibidas; relaciones entre teoría y experimentación; relatividad de la verdad objetiva que se busca y función de las analogías y metáforas.

La arqueología es, de las ciencias que estudian el pasado, la que ha sufrido mayores transformaciones a lo largo del siglo. Superada la época romántica de la recuperación de las obras de arte de la antigüedad clásica, cerrada ya la obligada interpretación marxista de los medios de producción y clases sociales de las civilizaciones del pasado, intenta hoy liberarse del corsé positivista que le fuerza a guiarse por una rígida normativa que le es impropia (no sólo por ser ciencia "blanda", sino, sobre todo, por su naturaleza eminentemente histórica).

Con el método importa el contenido. El cartesianismo del XVII coincide con el neopositivismo en quedarse en la heuresis, en esbozar unas reglas que conduzcan a las puertas de la verdad, pero sin traspasar el umbral. La nueva historia de la ciencia, en particular la nueva arqueología, busca ahondar sus principios, su contenido, en la incorporación de otras ciencias: la geobotánica, por ejemplo, con sus potentes medios cartográficos y estadísticos. No se imaginaba Braun Blanquet, maestro de los fitosociólogos españoles de la posguerra, que sus asociaciones y alianzas iban a servir para descubrir la historia de la minería de los pueblos primitivos de Africa o de Sri Lanka.



Viola calaminaria *(amarillo) y* Armeria maritima *subsp.* calaminaria *(rojo) crecen espontáneas sobre minas de zinc, en las proximidades de Aquisgrán.*

Nueva tendencia en historia de la física es la que insiste en el desarrollo matemático de la misma, a veces con tanto aparato que tentado se halla uno a pensar si no ha errado el camino. Valga de muestra *From Maxwell to microphysics*, de Jed Z. Buchwald. Abre éste, ahora sin fórmulas, el primer libro de reseña con un artículo cuyo título —y su desarrollo— juega con la paradoja y la provocación: "La invención de la polarización". En particular estudia el seleccionismo del físico francés de comienzos del siglo XIX Etienne Louis Malus; dicha corriente concebía la polarización como un proceso en el que se escogen (se seleccionan) los rayos de un haz que atraviesa un medio y éstos presentan alteradas las asimetrías de dirección. En ese contexto, los rayos que conformaban eran "cosas" reales que podían contarse, no meros constructos matemáticos.

Se repite hasta la saciedad que la revolución científica nació a extramuros de las universidades. Más. Estas vendrían a constituir, por su enseñanza libresca, una rémora contra las instituciones que alentaban el saber empírico. Mordechai Feingold rompe con ese tópico al revelarnos el nivel experimental (observatorios, instrumentos y laboratorios) de Cambridge y Oxford, así como el sutil cordón umbilical que unía esos centros con la Real Sociedad Londinense. En resumen: no se puede entender el asentamiento y el alcance de la revolución científica sin devolverle el honor a los sitios tradicionales de transmisión del conocimiento. ¿Habrá que avanzar en esa nueva línea para levantar el mismo anatema que pesa sobre las universidades españolas de los siglos XVII y XVIII?

Más de uno se sigue preguntando por qué pudo caer el sistema kantiano ante el movimiento romántico de la *Naturphilosophie* de Schelling. Gregory aduce tres causas: las formas *a priori*, por las que la razón impone el marco del saber, la limitación de la explicación científica a la explicación mecánica (frente al vitalismo romántico) y la filosofía de la ciencia de Kant, encerrada en sí misma.

Impone la historia contemporánea de la ciencia. Por eso es oportuno el trabajo de Karl Hufbauer, sobre la revista *Solar Physics*, como vehículo catalizador de esa rama de la astronomía. Con ella como meta primero, como objeto central luego y siempre como telón de fondo, va trenzando el desarrollo de una de las ciencias mejor consolidadas en menos tiempo (y a la que España ha aportado un más que decoroso grano de arena). El artículo es fecundo en sugerencias: importancia del contacto entre investigadores aliados durante la segunda

guerra para la creación de equipos y relación entre observatorios, acabada la misma; significación para el despegue de la astronomía solar de los trabajos sobre radar y medios y técnicas asociados (espectros y filtros); el tirón de la carrera espacial desde las postrimerías de los cincuenta y un largo etcétera.

¿Necesitan las nuevas teorías del arrojo de los intrépidos? Así lo creyó Einstein cuando propuso la candidatura de Niels Bohr ante la Academia de Berlín. Quizá se necesitó ese temple para sacar adelante la mecánica cuántica, a pesar de arrepentirse éste mil y una veces de haber publicado demasiado pronto. El trabajo de Klein, en especial en lo más bohriano, el espectro atómico, abre un mundo de sentimientos —entre la intrepidez y la cautela— que parecerían ajenos a tema tan árido. Arido en grado sumo puede serlo la matemática, e historiarse, sin embargo, con el ingenio de Federigo Enriques; pero se desnaturaliza en cuanto la confundimos con la adscripción política de sus practicantes, y en ese error cae Herbert Mehrtens al ocuparse de la disciplina en el Tercer Reich.

¿Cómo era la química del XIX? Carente de modelos mecánicos y de soporte matemático riguroso, conoció una extraña ambivalencia entre la metáfora de sus expresiones —afinidad, ataque molecular, conjugación, etcétera— y la búsqueda de rigor epistemológico de un saber que estaba cambiando radicalmente la industria. Mary Jo Nye agrega a esa investigación el análisis de las distintas representaciones (figurativas, geométricas o literarias) de la estequiometría con la ponderación del valor que los químicos daban a las mismas, una línea de trabajo que se echaba en falta desde hacía tiempo.

En el penúltimo capítulo, R. C. Olby expone los puntos débiles de la sociología de la ciencia a través de un caso histórico tan falseado cuan arraigado: el "redescubrimiento" de las leyes de Mendel por De Vries, Correns y Tschermak. No sólo no hubo una feliz coincidencia en 1899 porque la ciencia estaba madura para admitir una herencia por unidades discretas (explicación sociológica, reiterada *ad nauseam*), sino que quien más quien menos copia al fraile, si es que le entiende bien. Cierra la obra un ensayo de especial interés para la historia de la ciencia española... por defecto: el reclamo, por parte de las repúblicas hispanoamericanas recién emancipadas, de científicos extranjeros (franceses y alemanes) para los nuevos centros que se instauraban y que, desgraciamente, resultaron de vida efímera en muchos casos.

Critical traditions... se divide en tres partes: análisis filosófico, fundamentos históricos y contexto sociopolítico. El primer apartado responde a una proyección de la filosofía analítica sobre el trabajo arqueológico. Viene a ser un alto para reflexionar sobre qué entender por explicación, la relación entre teoría y método, la distinción entre rigor formal y sustantividad de lo expuesto; es decir, una filosofía de la arqueología, una metaarqueología. Ni que decir tiene que al arqueólogo de campo le atrae muy poco el preciosismo formalista que, por su generalidad, suele estar ayuno de contenido, y, puestos a escoger, prefiere la inducción probabilista, tangible y real, a la deducción nomológica, de dudosa eficacia.

En lo relativo a los fundamentos históricos de esa ciencia, las colaboraciones se dividen entre los que insisten en la dependencia de los principios filosóficos, marxistas incluidos, los que atienden al establecimiento de leyes protectoras del patrimonio y los que abogan por un repaso de lo realizado en el tiempo tomando como ejemplo seis aproximaciones a un mismo yacimiento, el de Stonehenge. En la tercera y última parte, la dedicada a la sociopolítica de la arqueología, se pretende destacar la implicación entre organización social (democrática, jerárquica) y cultura (plebeya o refinada), de acuerdo con determinada interpretación de la escuela de Frankfurt (marxista), confundiéndose a veces arqueología con producción material.

Compleméntase la filosofía y la sociología de una ciencia con el ensanchamiento y la profundización del contenido propio de la misma. En arqueología se abre un nuevo frente al asociarla a la geobotánica. El libro de Brooks y Johannes es el primero que se publica sobre fitoarqueología. Ayuda esta nueva incorporación a depurar el método de búsqueda de yacimientos: plantas que denuncian la presencia en el pasado de actividad minera (resistentes a determinados iones), de asentamientos urbanos, de sistemas de irrigación. Y no solamente plantas, las asociaciones vegetales se convierten en indicadores casi infalibles.

Se aprecian mejor las asociaciones y alianzas de especies desde el aire. Y en eso, la fitoarqueología aérea es el método más idóneo para el investigador. Los análisis de suelos y plantas en la primera parte y la interpretación de las fotografías permiten descubrir nuevos puntos de actividad en el pasado, y, en definitiva, el pasado mismo. (L.A.)

LA DIFFUSIONE DELLE SCIENCE ISLAMICHE NEL MEDIO EVO EUROPEO. Convegno internazionale promosso dall' Accademia Nazionale dei Lincei, fondazione Leone Caetani, e dall'Università di Roma "La Sapienza". Roma, 1987. **PICATRIX. THE LATIN VERSION.** Preparada por David Pingree. The Warburg Institute; Londres, 1986.

La recepción y asimilación de la ciencia árabe en el mundo cristiano medieval ha sido historiada en dos libros básicos de H. Schipperges, donde defiende su desarrollo en dos oleadas: la primera, de mera recepción, ocurrió en las postrimerías del siglo XI y anduvo unida al nombre de Constantino el Africano y la escuela —hoy de composición e influencia debatidas— de Salerno; la segunda oleada, de sello toledano, se debería al impulso de Gerardo de Cremona, que podríamos completar con el que se da en el valle del Ebro (Tarazona y Zaragoza). El avance de los estudios se recoge en los dos libros de reseña. Corresponde el primero a un simposio celebrado en Roma en 1984; el segundo es la edición crítica de uno de los textos más leídos en toda Europa, continental e insular.

La transmisión se hizo a través de la traducción. Charles Burnett, que ha publicado fragmentos de Hugo de Santalla, Hermann de Carintia y Adelardo de Bath, todos del siglo XII, abre el primer volumen explicándonos tres estilos de traducir sin traicionar: rebuscado, severo y literal. El empleo del término exacto, y del tecnicismo cuando ya existe, nos revela si el traductor entendía lo que estaba trasladando. Lo mismo que la interpolación habitual nos denuncia, por lo común, un texto académico o de uso escolar. Hubo maestros en ese arte que han pasado a la historia general de la cultura, como Constantino, Hugo, Juan de Sevilla, Hermann, Gerardo de Cremona, Miguel Escoto o Guillermo de Moerbeke. Pero hubo también mucho traductor anónimo en cortes, monasterios y círculos episcopales como el reunido por Raimundo en Toledo.

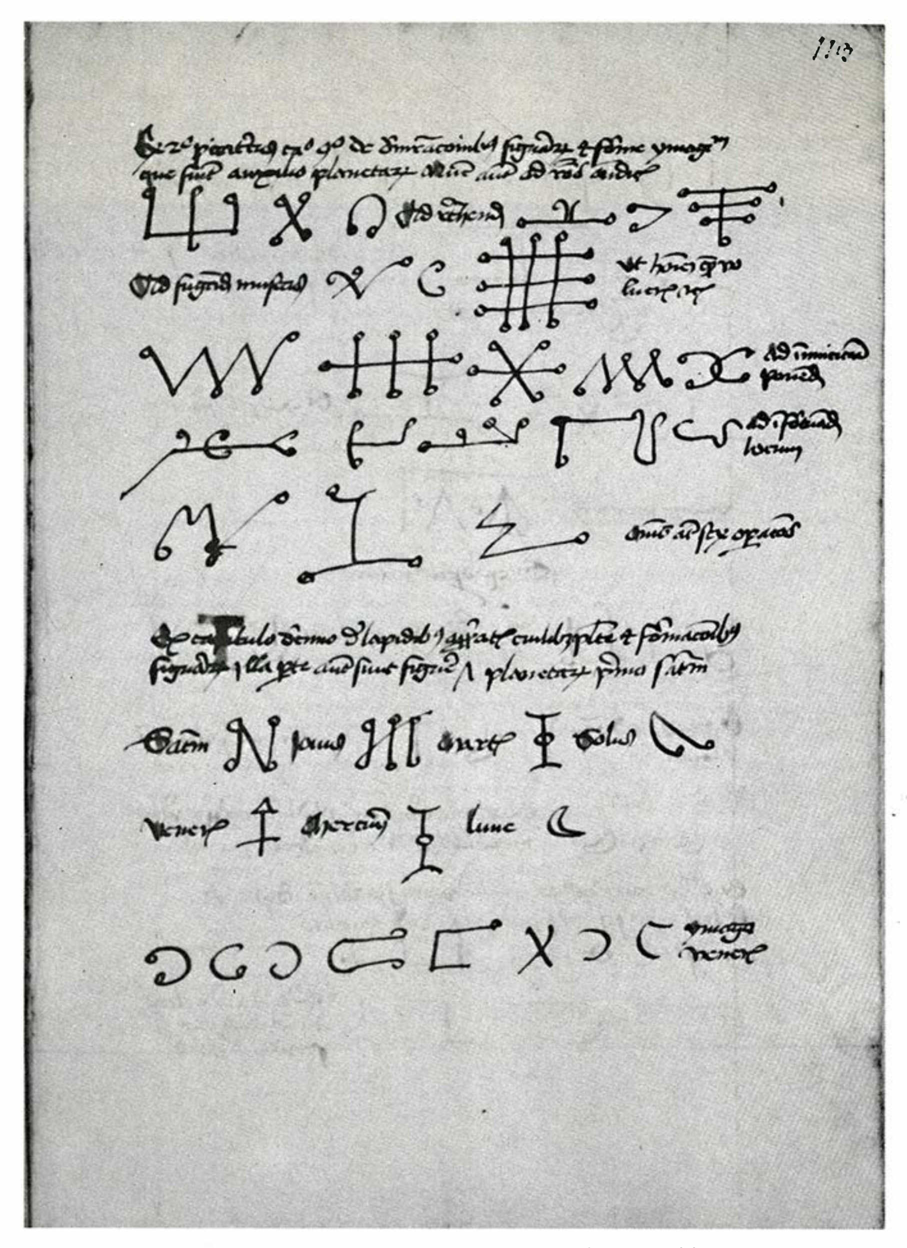
El mensaje transmitido, la ciencia árabe, había progresado bastante en matemática, astronomía, botánica y medicina. También en ingeniería. Cierto es que desde el siglo XIII se van levantando voces críticas, que elevan su tono con los humanistas del XV

y XVI, objeto aquí de revisión por Peter Dilg. Los contenidos aparecen envueltos, a veces, en un lenguaje esotérico de alquimia o astrología, propios de la época; pero se trata de una alquimia y una astrología ilustradas (ligadas a la química y a la astronomía), en oposición a la mera magia, nigromancia y otras embaucaciones proscritas por el propio Corán.

De la astrología judicativa o ilustrada se ocupó el simposio, con sendos ensayos de Gabriella Federici y de David Pingree. El trabajo de éste puede servir de introducción general al segundo libro de reseña. Se han conservado más de 50 manuscritos anteriores al año 1300, que traducen 21 tratados de magia ilustrada. De su análisis llega Pingree a las conclusiones siguientes: las pocas traducciones del árabe realizadas en Italia en las postrimerías del siglo XI, con lapidarios más antiguos, pasaron a Francia y, de aquí, a Inglaterra en los primeros años de la centuria inmediata; las traducciones realizadas en España durante el siglo XII, bastantes, aparecieron en Francia y en Inglaterra antes de 1250; hubo otra oleada de traducciones —del árabe y del hebreo— iniciada en la corte de Alfonso X que se propagó por el sur de Francia, entre los médicos cristianos y judíos, en torno al 1300, y, por fin, desde Montpellier esa tradición mágica se expandió hacia Italia, Brabante e Inglaterra.

Magia ilustrada es la que opera con talismanes y amuletos, donde éstos son piedras dotadas de supuestos poderes, que acabarían fomentando el desarrollo de los lapidarios, o tratados de minerales. Los talismanes eran imágenes incisas en metal, cuyo sentido sólo se descubría a partir de un profundo conocimiento astrológico. Las dos principales obras sobre magia ilustrada fueron el *De radiis* de al-Kindi y el *Picatrix* del pseudo al-Majriti. Relacionado con los lapidarios, por proceder de ellos u originarlos, de forma particular con el del rey sabio, estuvo el *Picatrix*, traducido hacia 1256. Del árabe al castellano lo vertió Yehuda ben Moshe; del castellano al latín Gil de Thebaldis, seguramente.

El *Picatrix* conoció su máximo esplendor durante el Renacimiento y el comienzo de la Edad Moderna. El texto crítico que Pingree ofrece se basa en la colación de todos los manuscritos existentes y en el cotejo, palabra a palabra, del texto árabe. España, cuna y origen de su traducción al latín, dejó en ésta su impronta. (Del trabajo del editor sacarán partido los alumnos de paleografía de



Signos talismánicos del Picatrix. *Manuscrito copiado en 1466, que se conserva en la vienesa Biblioteca Nacional de Austria.*

cualquier especialidad, tal es la claridad y pulcritud mostrada.)

Muy pocos caen en la cuenta del papel de Roma en el asentamiento en Occidente de la ciencia musulmana. La cultura árabe entró en la curia papal por valija diplomática, es decir, a través de sus enclaves en Oriente, por legaciones o misiones, que obligan a conocer el árabe, el persa y el siríaco. Y eso cuando en la Universidad de París no había nadie capaz de traducir directamente un fragmento de Avicena. En Roma encontramos a Simón de Génova, antes de partir hacia Creta para identificar la flora dioscorídea; allí vemos a Accursino de Pistoya, traductor de Galeno; en Viterbo respira un poderoso movimiento ptolemaico y óptico. Por Roma pasan muchas figuras toledanas, camino hacia la corte de Federico II.

El lector encontrará muchos capítulos interesantes, de acuerdo con sus preferencias: astronomía, paleografía, botánica, revisiones generales de especial dureza contra el discrepante (Lemay) o exposiciones amables del progreso de los discípulos (Vernet). Hay una colaboración de aprovechamiento general, la de Poullé sobre astronomía planetaria de los siglos XII-XIV: con didáctica nitidez explica el significado de los distintos términos que se empleaban, y que en parte seguimos usando. (L. A.)

Apuntes

No sólo es derrochadora la naturaleza, sino que, además, se equivoca. Los exones —fragmentos de genes que determinan la secuencia aminoacídica real de una proteína— pueden engarzarse en un orden erróneo y no vehicular la información que debieran del ADN. Nos indica ello que el proceso de maduración de ARN no posee la finura que se le atribuía y aporta, de su propia cosecha, una variabilidad desconocida. Hay quien comienza a ver ahí un nueva aspecto del mundo de ARN que se supone originario de la vida.

¿Con qué se ha manchado? Esa es la nueva pregunta que inicia el examen exhaustivo de los satélites en órbita una vez recuperados y traídos por la lanzadera espacial. LDEF es acrónimo inglés del satélite autónomo de larga exposición que ha estado seis años en el espacio, lanzado hasta una órbita de 480 kilómetros de altitud y recuperado por la nave Columbia a una altitud de 310 km. Su masa, su prolongada estancia en el espacio y los materiales que llevaba a bordo hacen del mismo un objeto excepcional para estudiar la radiactividad inducida. Lo que no se esperaba es que su borde frontal portara una elevada concentración de berilio-7, porque este elemento, de una vida media de sólo 53 días, se forma a unos 40 km de altitud, 270 por debajo de la órbita de LDEF, ¿Cómo llegó hasta el morro? Solución provisional: por su fácil transporte y su cabal absorción en la superficie del ingenio aerospacial.

Las macroestructuras no constituyen ningún fenómeno raro en el universo. Que esa tendencia a formar islas de densidad llegaba a los cuásares, los objetos más luminosos y distantes, se sostenía desde hace unos diez años. R. G. Clowes y L. E. Campuzano acaban de descubrir la prueba más sólida en un grupo formado por 10 cuásares con un corrimiento hacia el rojo entre 1,2 y 1,4: a un cuarto de distancia de los objetos más remotos que conocemos y que se formaron cuando el universo había pasado por el ecuador de su vida.

El protoindoeuropeo, que sirvió de plantilla a los lenguajes hablados de Bretaña a la India, se propagó a lomos de caballo. Ucrania fue cuna de su domesticación hace seis mil años, según prueba el bocado desenterrado en el yacimiento de Sredny Stog. Su monta acortó distancias, primero en la estepa, y luego en todo el continente. Para la arqueología constituye además el hilo que une el rosario de asentamientos que comienzan a proliferar a este (hasta Mongolia) y oeste (hasta las llanuras de Hungría).

Ante la degradación de nuestras ciudades por la contaminación con SO_2, fluoruros y numerosos elementos metálicos emitidos por particulares e industrias, los primeros que huyen son los líquenes. Tal es su sensibilidad a esas agresiones que se les considera óptimos bioindicadores ambientales. Y, desde ahora, de la evolución histórica de las concentraciones urbanas. El cotejo de las herborizaciones periódicas de algunas ciudades (Turín se toma de ejemplo) permite asociar la pérdida de especies liquénicas con la expansión de las urbes.

Si la ciencia ha sido, en buena parte de su historia, coto reservado al varón, parece que habrá que empezar a reconocer parcelas donde la mujer está especialmente capacitada para trabajar; por ejemplo, en etología de primates. Debemos a Jane Goodall, Biruté Galdikas y Dian Fossey cuanto sabemos sobre el comportamiento de chimpancés, orangutanes y gorilas. Se dice que ha sido así porque primaron al individuo, a través de sentimientos de afecto y empatía, sobre el grupo.

Es aforismo de la teoría inflacionaria de nuestro mundo que, a universo muerto, universo puesto. Tras un proceso de expansión exponencial, se ve forzado a incoar un proceso inverso de contracción, o ''deflación'', que termina por encoger toda la masa cósmica en un punto de densidad máxima, a partir del cual se produce un nuevo estallido inicial (''big bang''). Aunque posible ese modelo, se cuestiona ya su probabilidad: para que comience la inflación expansiva, buenas son ciertas condiciones iniciales, pero sólo empezará la deflación si se cumplen estrictamente determinadas condiciones de partida.

¿Envejecemos porque somos víctimas de nuestras propias proteasas o porque envejecemos volvemos contra nosotros la acción de esas enzimas? El dilema se ha planteado tras descubrirse que las membranas de eritrocitos de ancianos contenían productos resultantes de la degradación de una proteína de transmembrana. Reproducido ese fenómeno *in vitro*, se sospecha que la esperanza de vida de los eritrocitos se acorta por una mutación en la superficie externa de la membrana, cambio inducido por la proteolisis.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



NUBES ESTRATOSFERICAS POLARES Y EMPOBRECIMIENTO EN OZONO, por Owen B. Toon y Richard P. Turco
Raramente se forman nubes en la seca estratosfera antártica, pero cuando lo hacen, conspiran químicamente con los halocarburos para crear el "agujero de ozono" que se abre todas las primaveras.

FACTORES DE TRANSCRIPCION Y CONTROL DE LA EXPRESION GENICA, por Antonio Celada
Interaccionan con áreas específicas del ADN y controlan la expresión de los genes. El estudio de estos factores nos permitirá entender el desarrollo del cáncer, la autoinmunidad o el envejecimiento.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LOS ARCOS PRIMITIVOS, por Edward McEwen, Robert L. Miller y Christopher A. Bergman
Durante milenios el útil más efectivo de cazadores y guerreros, el arco exhibe una variedad de modificaciones que reflejan las necesidades funcionales de quienes lo tensaron.

CIRUGIA CON LASER, por Michael W. Berns
El láser está modificando el quehacer médico. Estas cuchillas de luz sirven para manipular células aisladas o para actuar sobre órganos.

MIRANDO HACIA DENTRO, por Corey S. Powell
Nuevas tecnologías permiten a los geofísicos discernir las estructuras escondidas en el interior profundo de la Tierra. Sus descubrimientos ofrecen la posibilidad de mirar hacia el futuro del planeta.

ARTHUR STANLEY EDDINGTON, por Sir William McCrea
Dirigió una expedición astronómica para comprobar la teoría de la relatividad general de Einstein, defendió la idea de un universo en expansión y describió la estructura interna de las estrellas.

EL CUASAR 3C 273, por Thierry J.-L. Courvoisier y E. Ian Robson
Núcleo de una galaxia activa, se trata de uno de los objetos más luminosos del universo conocido. En su examen del espectro de radiación del 3C 273, los astrónomos van descubriendo por qué brillan los cuásares.

PROTEINA ESTREPTOCOCICA M, por Vincent A. Fischetti
La bacteria responsable de la faringitis y fiebres reumáticas utiliza esta molécula superficial para eludir las defensas corporales. La clave del poder de la proteína reside en su peculiar estructura.

